

150

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日 2 0 0 3 年 7 月 1 6 日
Date of Application:

出 願 番 号 特 願 2 0 0 3 - 2 7 5 5 5 4
Application Number:
[ST. 10/C]: [J P 2 0 0 3 - 2 7 5 5 5 4]

出 願 人 三 菱 電 機 株 式 会 社
Applicant(s):

2 0 0 3 年 1 0 月 2 1 日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今 井 康 夫



出証番号 出証特 2 0 0 3 - 3 0 8 6 7 5 1

【書類名】 特許願
【整理番号】 541887JP03
【提出日】 平成15年 7月16日
【あて先】 特許庁長官殿
【国際特許分類】 H01S 5/028
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内
 【氏名】 嶋原 君男
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内
 【氏名】 川崎 和重
【特許出願人】
 【識別番号】 000006013
 【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号
 【氏名又は名称】 三菱電機株式会社
【代理人】
 【識別番号】 100086405
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 河宮 治
 【電話番号】 06-6949-1261
 【ファクシミリ番号】 06-6949-0361
【選任した代理人】
 【識別番号】 100098280
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 石野 正弘
 【電話番号】 06-6949-1261
 【ファクシミリ番号】 06-6949-0361
【選任した代理人】
 【識別番号】 100113170
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 稲葉 和久
 【電話番号】 06-6949-1261
 【ファクシミリ番号】 06-6949-0361
【先の出願に基づく優先権主張】
 【出願番号】 特願2002-283438
 【出願日】 平成14年 9月27日
【先の出願に基づく優先権主張】
 【出願番号】 特願2003- 57238
 【出願日】 平成15年 3月 4日
【手数料の表示】
 【予納台帳番号】 163028
 【納付金額】 21,000円
【提出物件の目録】
 【物件名】 特許請求の範囲 1
 【物件名】 明細書 1
 【物件名】 図面 1
 【物件名】 要約書 1
 【包括委任状番号】 0010684

【書類名】 特許請求の範囲**【請求項 1】**

活性層と、前記活性層を挟む 2 枚のクラッド層とからなる導波層を含む積層構造体と、前記積層構造体の一对の相対する端面部のうち少なくとも一方の端面部に形成された多層反射膜とを備え、

前記多層反射膜は、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ が、前記導波層を導波する光の波長 λ について、 $\sum n_i d_i > \lambda/4$ の関係を満足すると共に、

前記多層反射膜は、前記波長 λ の場合の反射率 $R(\lambda)$ を基準として、+2.0%以下となる前記波長 λ を含む連続する波長帯域幅 $\Delta\lambda$ が、前記積層構造体の実効屈折率 n_c と前記波長 λ の場合の反射率 $R'(\lambda)$ について、下記の関係式、

$$R'(\lambda) = ((n_c - n_f)^2 / (n_c + n_f)^2)^2$$

を満たす屈折率 n_f の仮想単層反射膜を厚さ $5\lambda / (4n_f)$ だけ前記端面部に形成した場合の反射率 R' を基準として、+2.0%以下となる前記波長 λ を含む連続した波長帯域幅 $\Delta'\lambda$ よりも広いことを特徴とする半導体光素子。

【請求項 2】

活性層と、前記活性層を挟む 2 枚のクラッド層とからなる導波層を含む積層構造体と、前記積層構造体の一对の相対する端面部のうち少なくとも一方の端面部に形成された多層反射膜とを備え、

前記多層反射膜は、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ が、前記導波層を導波する光の波長 λ について、 $\sum n_i d_i > \lambda/4$ の関係を満足すると共に、

前記多層反射膜は、反射率が前記波長 λ の場合の反射率 $R(\lambda)$ を基準として-1%から+2.0%の範囲内となる前記波長 λ を含む連続する波長帯域幅 $\Delta\lambda$ を、前記波長 λ で割った値 $\Delta\lambda/\lambda$ が 0.062 以上であることを特徴とする半導体光素子。

【請求項 3】

活性層と、前記活性層を挟む 2 枚のクラッド層とからなる導波層を含む積層構造体と、前記積層構造体の一对の相対する端面部のうち少なくとも一方の端面部に形成された多層反射膜とを備え、

前記多層反射膜は、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ が、前記導波層を導波する光の波長 λ について、 $\sum n_i d_i > \lambda/4$ の関係を満足すると共に、

前記多層反射膜は、反射率が前記波長 λ の場合の反射率 $R(\lambda)$ を基準として-1.5%から+1.0%の範囲内となる前記波長 λ を含む連続する波長帯域幅 $\Delta\lambda$ を、前記波長 λ で割った値 $\Delta\lambda/\lambda$ が 0.066 以上であることを特徴とする半導体光素子。

【請求項 4】

前記多層反射膜は、前記導波層を含む前記積層構造体の実効屈折率 n_c の平方根より大きい屈折率の第 1 反射膜と、前記実効屈折率 n_c の平方根より小さい第 2 反射膜とを含むことを特徴とする請求項 1 に記載の半導体光素子。

【請求項 5】

前記多層反射膜は、前記第 1 反射膜と前記第 2 反射膜とが交互に積層されていることを特徴とする請求項 4 に記載の半導体光素子。

【請求項 6】

前記多層反射膜のうち、前記導波層に接する第 1 層膜は、前記導波層を含む前記積層構造体の実効屈折率 n_c の平方根よりも小さい屈折率を有することを特徴とする請求項 1 に記載の半導体光素子。

【請求項 7】

前記多層反射膜は、3種類以上の膜で構成されることを特徴とする請求項1に記載の半導体光素子。

【請求項8】

前記多層反射膜は、7層膜で構成されていることを特徴とする請求項1に記載の半導体光素子。

【請求項9】

前記多層反射膜は、6層膜で構成されていることを特徴とする請求項1に記載の半導体光素子。

【請求項10】

前記多層反射膜は、9層膜で構成されていることを特徴とする請求項1に記載の半導体光素子。

【請求項11】

前記多層反射膜のうち、前記導波層に接する第1層膜は、前記多層反射膜の中で最も大きい熱伝導率を有することを特徴とする請求項1に記載の半導体光素子。

【請求項12】

前記多層反射膜のうち、前記導波層に接する第1層膜は、窒化アルミニウムからなることを特徴とする請求項1に記載の半導体光素子。

【請求項13】

前記多層反射膜の反射率の極小値は、1～32%の範囲内にあることを特徴とする請求項1に記載の半導体光素子。

【請求項14】

前記多層反射膜のうち、前記導波層に接する第1層膜及び第2層膜は、前記導波層を含む前記積層構造体の実効屈折率 n_c の平方根よりも小さい屈折率を有することを特徴とする請求項1に記載の半導体光素子。

【請求項15】

前記多層反射膜は、8層膜で構成されていることを特徴とする請求項1に記載の半導体光素子。

【書類名】明細書

【発明の名称】半導体光素子

【技術分野】

【0001】

本発明は、光情報処理用の光源、光通信の信号、及びファイバアンプの励起光源などとして用いられる半導体レーザ素子、及び光信号を増幅する半導体増幅器及び光信号を変調する光変調器等の半導体光素子に関する。

【背景技術】

【0002】

半導体レーザ素子や、光変調器等の半導体光素子の端面部の導波層には、通常、反射膜がコーティングされている。この半導体光素子の端面部に設けられた反射膜（コーティング膜：屈折率 n_1 ）の膜厚 d を $\lambda / (4 n_1)$ の奇数倍とすると、反射膜の反射率は極小値をとる。さらに、端面部に導波層を含む積層構造体の屈折率 n_c の平方根の屈折率を有するコーティング膜を形成することによって無反射膜が得られる。例えば、半導体レーザの端面の反射膜を無反射膜とした例（例えば、非特許文献 1 を参照）が知られている。

【0003】

半導体光素子の端面部の導波層を含む積層構造体（実効屈折率 $n_c = 3.37$ ）に膜厚を変えて形成された単層反射膜（屈折率 $n_1 = 1.449$ ）の反射率の波長依存性を考える。ここで、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で反射率が最小値をとるように設定する。反射率が最小値をとる場合とは、 $\lambda / (4 n_1)$ の奇数倍の膜厚の場合である。そこで、膜厚 $\lambda / (4 n_1)$ の単層反射膜の場合と、膜厚 $5 \lambda / (4 n_1)$ の単層反射膜のそれぞれの場合について検討すると、膜厚 $\lambda / (4 n_1)$ の単層反射膜のほうが膜厚 $5 \lambda / (4 n_1)$ の単層反射膜より反射率の極小値近傍における平坦部分が広い。

【0004】

具体的には以下の通りである。厚さ $d_1 = \lambda / (4 n_1)$ の場合は、波長 980 nm で極小反射率値 4% となり、極小反射率値 $+2\%$ の波長帯域は 848 nm から 1161 nm の 313 nm と広い。一方、厚さ $d_1 = 5 \lambda / (4 n_1)$ の場合は、波長 980 nm で極小反射率値 4% は同じであるが、極小反射率値 $+2\%$ の波長帯域は 951 nm から 1011 nm の 60 nm と極端に狭くなる。このとき、波長帯域を所定の波長で割った値は 0.061 となる。また、極小反射率値 $+2.5\%$ の波長帯域は 949 nm から 1013 nm の 64 nm であり、この波長帯域を所定波長 980 nm で割った値は 0.065 となる。

【0005】

【非特許文献 1】 I. Ladany, et al., "Scandium oxide antireflection coatings for superluminescent LEDs", Appl. Opt. Vol. 25, No. 4, pp.472-473, (1986)

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

上記のように半導体光素子の端面部の反射膜の膜厚 d を $\lambda / (4 n_1)$ の奇数倍で厚膜化した場合には、反射率の極小値近傍における低反射率領域の波長帯域が狭くなり、半導体レーザ特性が反射膜の反射率の波長依存性の影響を受けて大きく変化するという問題があった。

【0007】

そこで、本発明の目的は、極小反射率近傍の波長帯域が広い反射膜を備えた半導体光素子を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明に係る半導体光素子は、活性層と、前記活性層を挟む 2 枚のクラッド層とからなる導波層を含む積層構造体と、

前記積層構造体の一对の相対する端面部のうち少なくとも一方の端面部に形成された多層反射膜と

を備え、

前記多層反射膜は、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ が、前記導波層を導波する光の波長 λ について、 $\sum n_i d_i > \lambda/4$ の関係を満足すると共に、

前記多層反射膜は、前記波長 λ の場合の反射率 $R(\lambda)$ を基準として、+2.0%以下となる前記波長 λ を含む連続する波長帯域幅 $\Delta\lambda$ が、前記積層構造体の実効屈折率 n_c と前記波長 λ の場合の反射率 $R'(\lambda)$ とについて、下記の関係式、

$$R'(\lambda) = ((n_c - n_f)^2 / (n_c + n_f)^2)^2$$

を満たす屈折率 n_f の仮想単層反射膜を厚さ $5\lambda / (4n_f)$ だけ前記端面部に形成した場合の反射率 R' を基準として、+2.0%以下となる前記波長 λ を含む連続した波長帯域幅 $\Delta'\lambda$ よりも広いことを特徴とする。

【0009】

本発明に係る半導体光素子は、活性層と、前記活性層を挟む2枚のクラッド層とからなる導波層を含む積層構造体と、

前記積層構造体の一对の相対する端面部のうち少なくとも一方の端面部に形成された多層反射膜と

を備え、

前記多層反射膜は、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ が、前記導波層を導波する光の波長 λ について、 $\sum n_i d_i > \lambda/4$ の関係を満足すると共に、

前記多層反射膜は、反射率が前記波長 λ の場合の反射率 $R(\lambda)$ を基準として-1.0%から+2.0%の範囲内となる前記波長 λ を含む連続する波長帯域幅 $\Delta\lambda$ を、前記波長 λ で割った値 $\Delta\lambda/\lambda$ が0.062以上であることを特徴とする。

【0010】

本発明に係る半導体光素子は、活性層と、前記活性層を挟む2枚のクラッド層とからなる導波層を含む積層構造体と、

前記積層構造体の一对の相対する端面部のうち少なくとも一方の端面部に形成された多層反射膜と

を備え、

前記多層反射膜は、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ が、前記導波層を導波する光の波長 λ について、 $\sum n_i d_i > \lambda/4$ の関係を満足すると共に、

前記多層反射膜は、反射率が前記波長 λ の場合の反射率 $R(\lambda)$ を基準として-1.5%から+1.0%の範囲内となる前記波長 λ を含む連続する波長帯域幅 $\Delta\lambda$ を、前記波長 λ で割った値 $\Delta\lambda/\lambda$ が0.066以上であることを特徴とする。

【0011】

なお、 $\sum n_i d_i$ について、好ましくは $\sum n_i d_i > 5\lambda/4$ の関係を満たすことである。これによりさらに厚い反射膜とすることができる。また、上記波長帯域幅 $\Delta\lambda$ を、前記波長 λ で割った値 $\Delta\lambda/\lambda$ は、好ましくは、0.070以上であり、さらに好ましくは0.090以上、またさらに好ましくは0.10以上である。低反射率の波長帯域幅 $\Delta\lambda$ が広いと、反射率の波長依存性が小さいので、導波光の波長が変化した場合にも特性変化を抑制できる。

【発明の効果】

【0012】

本発明に係る半導体光素子によれば、多層反射膜のそれぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、導波層を導波する光の所定波長、例えば980nmの1/4波長より大きい。さらに、この多層反射膜の $\sum n_i d_i$ は、導波光のおよそ5/4波長よりも大きく、非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。また、多層反射膜は、波長の関数である反射率が、設定波長 λ における反射率-1%から+2%の範囲内となる連続する波長帯域幅 $\Delta\lambda$ を、上記波長 λ

で割った値 $\Delta\lambda/\lambda$ が 0.062 以上である。または、多層反射膜は、波長の関数である反射率が、設定波長 λ における反射率 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲内となる連続する波長帯域幅 $\Delta\lambda'$ を、上記波長 λ で割った値 $\Delta\lambda'/\lambda$ が 0.066 以上である。これにより、非常に厚い膜であるにもかかわらず、一定反射率の波長帯域 $\Delta\lambda$ ($\Delta\lambda'$) が広がる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0013】

本発明の実施の形態に係る半導体光素子について、添付図面を用いて説明する。なお、図面において、実質的に同一の部材には同一の符号を付している。

【0014】

まず、本発明の実施の形態に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜の反射率の算出について、図1から図5を用いて説明する。図1は、複素数表示された振幅反射率 r を示す複素平面図である。図2は、半導体光素子の端面部の単層反射膜を示す概略断面図である。図3は、図2の単層反射膜に代えて2層反射膜を設けた場合の概略断面図である。図4は、図2の単層反射膜に代えて4層反射膜を設けた場合の概略断面図である。図5は、単層反射膜に代えて7層反射膜を設けた場合の概略断面図である。波長 λ の光についての複素数表示された振幅反射率 r は、次式(1)で表され、図1の複素平面図上に表すことができる。

$$r = r_r(\lambda) + i r_i(\lambda) \quad (1)$$

ここで、 i は虚数単位 ($i = (-1)^{1/2}$) であり、 $r_r(\lambda)$ は、実数部であり、 $r_i(\lambda)$ は、虚数部である。通常用いられる反射率は、上記の振幅反射率の2乗であって、この反射率がゼロとなる場合とは、下記式(2a)、(2b)のように振幅反射率の実数部及び虚数部とが共にゼロとなる場合である。これらの関係式を解くことによって反射率がゼロとなる条件を得ることができる。

$$r_r(\lambda) = 0 \quad (2a)$$

$$r_i(\lambda) = 0 \quad (2b)$$

【0015】

一方、ゼロでない反射率を求めようとする場合には、図1の複素平面上で円周上の各点の振幅反射率が該当することとなるため、上記のような条件式が一義的には定まらない。そこで、導波する光の波長 λ について所望の反射率が得られる仮想的な単層反射膜を考える。図2は、半導体光素子の導波層10の端面に単層反射膜1を設けた仮想単層反射膜の概略断面図である。反射膜1は大気等の自由空間5に面している。単層反射膜1の振幅反射率 r を最小にする条件は、半導体光素子の導波層10を導波する光の波長 λ 、単層反射膜1の屈折率 n_f 及び膜厚 d_f を用いて、下記式(3)で表される。

【数1】

$$d_f = \frac{\lambda}{4n_f}(2m+1) \quad (3)$$

ここで、 $m=0, 1, 2, 3$ 等の負でない整数である。

【0016】

この仮想単層膜の振幅反射率 r の最小値は、下記式(4)で表される。

【数2】

$$r = \frac{n_c - n_f^2}{n_c + n_f^2} \quad (4)$$

【0017】

なお、反射率 R は、振幅反射率 r について、 $|r|^2$ で表される。つまり、 $R = ((n_c - n_f^2) / (n_c + n_f^2))^2$ で表される。従って、反射率 $R=4\%$ を得ようとする、半導体光素子の導波層の実効屈折率 $n_c=3.37$ の場合には、上記式を解いて、単層反射膜1の屈折率 n_f として、2.248又は1.499が得られる。しかし、通常

、このような屈折率を有する単層膜は得られないことが多い。そこで、上記仮想単層反射膜を多層反射膜で置換することについて検討する。

【0018】

上記の単層反射膜に代えて、2層反射膜を設けた場合の反射率について検討する。図3は、仮想単層反射膜に代えて、端面部に2層反射膜を用いた場合の概略断面図である。この2層反射膜の反射率の極小値を所定値に設定する条件について、本発明者らによる検討結果を説明する。2層反射膜を構成する第1層膜1及び第2層膜2の位相変化をそれぞれ ϕ_1 、 ϕ_2 とすると、下記式(5)及び(6)のように定義される。

【数3】

$$\phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \quad (5)$$

【数4】

$$\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d_2 \quad (6)$$

【0019】

この場合に、複素数表示による振幅反射率 r は次式(7)で表される。

【数5】

$$r = \frac{\text{Re}1 + i \text{Im}1}{\text{Re}2 + i \text{Im}2} \quad (7)$$

ここで、 i は虚数単位であり、 $\text{Re}1$ 及び $\text{Re}2$ はそれぞれ分子・分母の実数部であり、 $\text{Im}1$ 、 $\text{Im}2$ はそれぞれ分子・分母の虚数部である。

【0020】

上記式(7)の分子・分母における実部部 $\text{Re}1$ 、 $\text{Re}2$ と虚部部 $\text{Im}1$ 、 $\text{Im}2$ は、それぞれ次式(8a)から式(8d)のように表される。

【数6】

$$\text{Re}1 = (n_c - 1) \cos \phi_1 \cos \phi_2 + \left(\frac{n_1}{n_2} - \frac{n_2 n_c}{n_1} \right) \sin \phi_1 \sin \phi_2 \quad (8a)$$

【数7】

$$\text{Im}1 = - \left\{ \left(\frac{n_c}{n_2} - n_2 \right) \cos \phi_1 \sin \phi_2 + \left(\frac{n_c}{n_1} - n_1 \right) \sin \phi_1 \cos \phi_2 \right\} \quad (8b)$$

【数8】

$$\text{Re}2 = (n_c + 1) \cos \phi_1 \cos \phi_2 - \left(\frac{n_2 n_c}{n_1} + \frac{n_1}{n_2} \right) \sin \phi_1 \sin \phi_2 \quad (8c)$$

【数9】

$$\text{Im}2 = - \left\{ \left(\frac{n_c}{n_2} + n_2 \right) \cos \phi_1 \sin \phi_2 + \left(\frac{n_c}{n_1} + n_1 \right) \sin \phi_1 \cos \phi_2 \right\} \quad (8d)$$

【0021】

また、電力反射率 R は、上記振幅反射率 r を用いて $|r|^2$ で表される。この式(7)で表される振幅反射率が、式(4)で表される上記仮想単層反射膜の振幅反射率と等しくなるように厚さ d_1 及び d_2 を決めればよい。

【0022】

図4は、単層反射膜に代えて、端面部に4層反射膜を設ける場合の概略断面図である。この4層反射膜の反射率が設定波長で前記仮想単層膜の反射率と同一になる条件について

検討する。4層反射膜の場合には、振幅反射率は下記式(9)で表される。

【数10】

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12})n_c - (m_{21} + m_{22})}{(m_{11} + m_{12})n_c + (m_{21} + m_{22})} \quad (9)$$

【0023】

ここで、 m_{ij} (i, j は1又は2) は下記式(10)で表される。

【数11】

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos A\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin A\phi_1 \\ -in_1 \sin A\phi_1 & \cos A\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -in_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -in_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

なお、A、Bは、第1層膜1の膜厚Ad1、第2層膜2の膜厚Ad2、第3層膜3の膜厚Bd1、第4層膜4の膜厚Bd2とした場合の、それぞれの2層膜(ペア)の寄与率を表すパラメータである。

【0024】

図5は、単層反射膜に代えて、導波層10の端面部に7層反射膜20を設けた場合の概略断面図である。この7層反射膜20の反射率が前記仮想単層膜の反射率と同一になるように設定する条件について検討する。7層反射膜20の場合には、振幅反射率は、4層反射膜と同様に下記式(11)で表される。

【数12】

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12})n_c - (m_{21} + m_{22})}{(m_{11} + m_{12})n_c + (m_{21} + m_{22})} \quad (11)$$

【0025】

ここで、 m_{ij} (i, j は1又は2) は下記式(12)で表される。

【数13】

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos O\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin O\phi_2 \\ -in_2 \sin O\phi_2 & \cos O\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos A\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin A\phi_1 \\ -in_1 \sin A\phi_1 & \cos A\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -in_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -in_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos C\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin C\phi_1 \\ -in_1 \sin C\phi_1 & \cos C\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos C\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin C\phi_2 \\ -in_2 \sin C\phi_2 & \cos C\phi_2 \end{pmatrix} \quad (12)$$

なお、O、A、B、Cは、第1層膜11の膜厚Od2、第2層膜12の膜厚Ad1、第3層膜13の膜厚Ad2、第4層膜14の膜厚Bd1、第5層膜15の膜厚Bd2、第6層膜16の膜厚Cd1、第7層膜17の膜厚Cd2とした場合の、それぞれの2層膜(ペア)の寄与率を表すパラメータである。

【0026】

実施の形態1.

本発明の実施の形態 1 に係る半導体光素子について、図 5 及び図 6 を用いて説明する。図 5 は、単層反射膜に代えて 7 層反射膜を設けた場合の概略断面図である。この半導体光素子は、例えば、半導体レーザ素子、光変調器、光スイッチ等である。この半導体光素子は、光が導波する導波層の端面部に所定波長を中心とした広い波長帯域にわたって低反射率を有する多層反射膜を設けている。このように低反射率の多層反射膜を設けることにより、例えば、半導体レーザ素子の場合にはいわゆる戻り光によるノイズ等の発生を低減することができる。また、光変調器及び光スイッチの場合には、信号を低損失で透過させることができる。また、この多層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率を有するので、発振波長が変化した場合や、信号の中心波長が変化した場合にも反射特性の波長依存性を抑制できる。

【0027】

以下、半導体光素子の端面部に設けた 7 層反射膜 20 について図 5 を用いて説明する。図 5 は、半導体光素子の端面部に設けた 7 層反射膜 20 の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子では、導波層 10（等価屈折率 $n_c = 3.37$ ）の端面部に、アルミナの第 1 層膜 11（屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $O d_2$ ）、酸化タンタルの第 2 層膜 12（屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 $A d_1$ ）、アルミナの第 3 層膜 13（屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $A d_2$ ）、酸化タンタルの第 4 層膜 14（屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 $B d_1$ ）、アルミナの第 5 層膜 15（屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $B d_2$ ）、酸化タンタルの第 6 層膜 16（屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 $C d_1$ ）、アルミナの第 7 層膜 17（屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $C d_2$ ）が順に積層されている。また、第 7 層膜 17 は大気等の自由空間 5 と接している。

【0028】

この半導体光素子の端面部に設けられた 7 層反射膜 20 の反射特性について説明する。まず、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 2% とする。各パラメータを、 $O = 0.2$ 、 $A = 2.2$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 0.45844$ 、 $\phi_2 = 1.14932$ である場合に波長 980 nm で反射率 2% が得られる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 22.13 \text{ nm} / 76.47 \text{ nm} / 243.44 \text{ nm} / 69.52 \text{ nm} / 221.31 \text{ nm} / 69.52 \text{ nm} / 221.31 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 923.7 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1590.57 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 6.49 倍と非常に厚い。即ち、導波する光の所定波長 980 nm について、その $5/4$ 波長よりも厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0029】

図 6 は、この 7 層反射膜 20 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。ここで設定反射率のおよそ +1% が目標反射率である。この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって目標反射率の 3% 前後の平坦部分が得られている。即ち、波長 968 nm から 1210 nm にわたって反射率は極小値の 1.3% から 4.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 2.0% を基準として、-1.0% から +2.0% の範囲、即ち、1.0% ~ 4.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 242 nm である。この波長帯域幅を設定波長 $\lambda (= 980 \text{ nm})$ で割った値は約 0.246 である。

【0030】

ここで、比較のために導波光の所定波長 980 nm について $5/4$ 波長の厚さの仮想単層反射膜を仮定する。設定条件は、波長 980 nm で極小反射率 4% をとるように、 $n_c = 3.37$ 、 $n_1 = 1.449$ である。この場合、極小反射率を基準として +2%、すなわち反射率 4% ~ 6% の波長範囲は $951 \text{ nm} \sim 1011 \text{ nm}$ であり、その波長帯域幅は 60 nm である。この波長帯域幅の広さの目安として、導波光の所定波長 980 nm で割ると 0.061 が得られる。

【0031】

そこで、この実施の形態1に係る7層反射膜について、上記仮想単層反射膜と比較すると、導波光の波長での反射率+2%のとなる波長帯域幅をその波長で割った商は、0.246であり、仮想単層反射膜の0.061よりはるかに大きい。したがって、この7層反射膜は上述のように導波光の所定波長980nmについて5/4波長より厚い膜厚であるにもかかわらず、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0032】

実施の形態2.

本発明の実施の形態2に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図7を用いて説明する。図7は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、多層膜の構成において共通するが、設定波長 λ が879nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を2.0%としている点で相違する。各パラメータを、 $O=0.2$ 、 $A=2.2$ 、 $B=2.0$ 、 $C=2.0$ とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1=0.45844$ 、 $\phi_2=1.14932$ である場合に波長879nmで反射率2%が得られる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 19.85 \text{ nm} / 68.59 \text{ nm} / 218.35 \text{ nm} / 62.36 \text{ nm} / 198.50 \text{ nm} / 62.36 \text{ nm} / 198.50 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}} = \sum d_i$)は828.51nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1426.66nmであり、所定波長980nmについて1/4波長(=245nm)の約5.82倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0033】

図7は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長861nmから1098nmにわたって反射率は極小値の1.3%から4.0%の範囲内に収まっている。この場合、導波光の所定波長980nmを略中心として平坦部分が得られる。また、設定波長879nmの反射率2.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、1.0%~4.0%の範囲の連続した波長帯域幅 $\Delta\lambda$ は237nmである。この波長帯域幅を設定波長879nmで割った値は約0.270であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜は、上述のように導波光の所定波長980nmについて5/4波長より厚い膜厚であるにもかかわらず、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。なお、ここで「所定波長」とは、導波層を導波する光の波長であって、この場合には980nmの光としている。一方、「設定波長」とは、上記所定波長を低反射率の平坦部の略中心となるように設定する波長である。

【0034】

次に、極小反射率を基準として+2.0%となる波長帯域の広さについて、この7層反射膜と仮想単層反射膜とを比較検討する。この7層反射膜の極小反射率は1.3%である。そこで、極小反射率を基準として+2.0%となる波長範囲、つまり反射率3.3%以下の範囲は波長866nmから1089nmである。即ち、波長帯域幅としては223nmである。一方、仮想単層反射膜によって同一の極小反射率を実現しようとする場合、実効屈折率 $n_c=3.37$ であるので、単層膜の屈折率 n_f は1.637又は2.058とすればよい。例えば、図8に屈折率 $n_f=1.637$ であって、膜厚 $d=5\lambda/(4n_f)$ の仮想単層反射膜の波長依存性を示す。この仮想単層反射膜の極小反射率1.3%を基準として極小反射率+2.0%以内となる範囲は、波長952nmから1009nmである。即ち、波長帯域幅としては57nmである。したがって、7層反射膜は、膜厚 $d=5\lambda/(4n_f)$ の仮想単層反射膜に比べて低反射率の波長帯域が非常に広い。

【0035】

実施の形態3.

本発明の実施の形態3に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図9を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を3.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.2$ 、 $A = 2.4$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.518834$ 、 $\phi_2 = 0.789695$ とすることによって波長 980 nm で反射率3.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 15.21 \text{ nm} / 94.42 \text{ nm} / 182.47 \text{ nm} / 78.68 \text{ nm} / 152.06 \text{ nm} / 78.68 \text{ nm} / 152.06 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}} = \sum d_i$)は 753.58 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1330.83 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長($= 245 \text{ nm}$)の約5.43倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0036】

図9は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 841 nm から 1014 nm にわたって反射率は2.5%から5.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率3.0%を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $2.0\% \sim 5.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 173 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約0.177であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0037】

実施の形態4.

本発明の実施の形態4に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図10を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態3に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1035 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を3.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.2$ 、 $A = 2.4$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.518834$ 、 $\phi_2 = 0.789695$ とすることによって波長 1035 nm で反射率3.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 16.06 \text{ nm} / 99.72 \text{ nm} / 192.72 \text{ nm} / 83.10 \text{ nm} / 160.60 \text{ nm} / 83.10 \text{ nm} / 160.60 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}} = \sum d_i$)は 795.9 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1405.57 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長($= 258.75 \text{ nm}$)の約5.43倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0038】

図10は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 888 nm から 1071 nm にわたって反射率は2.5%から5.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長 1035 nm の設定反射率3.0%を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $2.0\% \sim 5.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 183 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1035 nm で割った値は約0.177であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0039】

実施の形態5.

本発明の実施の形態 5 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 11 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 1 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 4.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.15$ 、 $A = 2.5$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.52082$ 、 $\phi_2 = 0.767337$ とすることによって波長 980 nm で反射率 4.0% とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 11.08 \text{ nm} / 98.73 \text{ nm} / 184.70 \text{ nm} / 78.98 \text{ nm} / 147.76 \text{ nm} / 78.98 \text{ nm} / 147.76 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 747.99 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1323.92 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 5.40 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0040】

図 11 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、目標反射率の 5% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 834 nm から 10121 nm にわたって反射率は 3.5% から 6.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の設定反射率 4.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $3.0\% \sim 6.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 178 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.182 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0041】

実施の形態 6.

本発明の実施の形態 6 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 12 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 5 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1040 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 4.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.15$ 、 $A = 2.5$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.52082$ 、 $\phi_2 = 0.767337$ とすることによって波長 1040 nm で反射率 4.0% とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 11.76 \text{ nm} / 104.77 \text{ nm} / 196.00 \text{ nm} / 83.82 \text{ nm} / 156.80 \text{ nm} / 83.82 \text{ nm} / 156.80 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 793.77 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1404.95 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 5.73 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0042】

図 12 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、目標反射率の 5% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 885 nm から 1074 nm にわたって反射率は 3.5% から 6.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1040 nm の設定反射率 4.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $3.0\% \sim 6.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 189 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1040 nm で割った値は約 0.182 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0043】

実施の形態 7.

本発明の実施の形態 7 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 13 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 1 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 980 nm で目標反射率 5.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O=0.15$ 、 $A=2.5$ 、 $B=2.0$ 、 $C=2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1=0.541022$ 、 $\phi_2=0.741397$ とすることによって波長 980 nm で反射率 5.0% とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 10.71 \text{ nm} / 102.56 \text{ nm} / 178.45 \text{ nm} / 82.05 \text{ nm} / 142.76 \text{ nm} / 82.05 \text{ nm} / 142.76 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 741.34 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1391.41 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($=245 \text{ nm}$) の約 5.38 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0044】

図 13 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、目標反射率の 6% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 843 nm から 1013 nm にわたって反射率は 4.6% から 7.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の設定反射率 5.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 4.0% ~ 7.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 170 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.173 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0045】

実施の形態 8.

本発明の実施の形態 8 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 14 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 7 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 1035 nm で設定反射率 5.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O=0.15$ 、 $A=2.5$ 、 $B=2.0$ 、 $C=2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1=0.541022$ 、 $\phi_2=0.741397$ とすることによって波長 1035 nm で反射率 5.0% とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 11.31 \text{ nm} / 108.31 \text{ nm} / 188.47 \text{ nm} / 86.65 \text{ nm} / 150.77 \text{ nm} / 86.65 \text{ nm} / 150.77 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 782.93 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1391.41 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($=245 \text{ nm}$) の約 5.68 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0046】

図 14 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、目標反射率の 6% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 890 nm から 1070 nm にわたって反射率は 4.6% から 7.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1035 nm の設定反射率 5.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 4.0% ~ 7.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 170 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1035 nm で割った値は約 0.164 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0047】

実施の形態 9.

本発明の実施の形態 9 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 15 及び図 16 を用いて説明する。図 15 は、この半導体光素子の端面部の反射膜として、第 1 層膜に酸化タンタル膜を用いた 7 層反射膜 30 を設けた場合の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子は、実施の形態 1 に係る半導体光素子と比較すると、7 層反射膜 30 が導波層 10 側から酸化タンタル 21 / アルミナ 22 / 酸化タンタル 23 / アルミナ 24 / 酸化タンタル 25 / アルミナ 26 / 酸化タンタル 27 の順に積層されており、導波層 10 側の第 1 層膜 21 が酸化タンタルである点で相違する。具体的には、7 層反射膜 30 は、導波層 10 側から順に、酸化タンタルの第 1 層膜 21 (屈折率 $n_2 = 2.037$ 、膜厚 $O d_2$)、アルミナの第 2 層膜 22 (屈折率 $n_1 = 1.62$ 、膜厚 $A d_1$)、酸化タンタルの第 3 層膜 23 (屈折率 $n_2 = 2.037$ 、膜厚 $A d_2$)、アルミナの第 4 層膜 24 (屈折率 $n_1 = 1.62$ 、膜厚 $B d_1$)、酸化タンタルの第 5 層膜 25 (屈折率 $n_2 = 2.037$ 、膜厚 $B d_2$)、アルミナの第 6 層膜 26 (屈折率 $n_1 = 1.62$ 、膜厚 $C d_1$)、酸化タンタルの第 7 層膜 27 (屈折率 $n_2 = 2.037$ 、膜厚 $C d_2$) とが積層されている。なお、アルミナと酸化タンタルとが交互に積層されている点で実施の形態 1 に係る半導体光素子と共通する。

【0048】

この半導体光素子の端面部の 7 層反射膜 30 において、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 2.0% とする。この場合、各パラメータを $O = 1.15$ 、 $A = 1.82$ 、 $B = 1.97$ 、 $C = 2.06$ とすると、アルミナ及び酸化タンタルの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 がそれぞれ $\phi_1 = 0.645821$ 、 $\phi_2 = 1.452041$ の場合に波長 980 nm で反射率を 2% とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 126.62 \text{ nm} / 113.17 \text{ nm} / 200.38 \text{ nm} / 122.49 \text{ nm} / 216.90 \text{ nm} / 128.09 \text{ nm} / 226.81 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 1134.46 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 2174.63 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 8.88 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0049】

図 16 は、この 7 層反射膜 30 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、目標反射率の 3% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 996 nm から 1119 nm にわたって反射率は 1.5% から 4.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の設定反射率 2.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $1.0\% \sim 4.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 157 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.160 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0050】

実施の形態 10.

本発明の実施の形態 10 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 17 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 9 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 908 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 2.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 1.15$ 、 $A = 1.82$ 、 $B = 1.97$ 、 $C = 2.06$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.645821$ 、 $\phi_2 = 1.452041$ とすることによって波長 908 nm で反射率 2.0% とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 117.31 \text{ nm} / 104.85 \text{ nm} / 185.66 \text{ nm} / 113.49 \text{ nm} / 200.96 \text{ nm} / 118.68 \text{ nm} / 210.14 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 1051.09 nm である。それぞれの膜

の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2014.81 nmであり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 8.22 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0051】

図17は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 924 nm から 1037 nm にわたって反射率は 1.5% から 4.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 908 nm の設定反射率 2.0% を基準として、-1.0% から +2.0% の範囲、即ち、1.0% ~ 4.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 145 nm である。この波長帯域幅を設定波長 908 nm で割った値は約 0.160 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0052】

実施の形態 11.

本発明の実施の形態 11 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 18 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 9 に係る半導体光素子と比較すると、多層反射膜の構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 3.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 1.15$ 、 $A = 1.82$ 、 $B = 1.97$ 、 $C = 2.06$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タantalのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.893399$ 、 $\phi_2 = 1.26984$ とすることによって波長 980 nm で反射率 3.0% とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 110.73$ nm / 156.55 nm / 175.24 nm / 169.45 nm / 189.68 nm / 177.19 nm / 198.35 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1177.19 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2201.59 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 8.99 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0053】

図18は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約4%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 962 nm から 1053 nm にわたって反射率は 2.6% から 5.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の設定反射率 3.0% を基準として、-1.0% から +2.0% の範囲、即ち、2.0% ~ 5.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 91 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.093 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0054】

実施の形態 12.

本発明の実施の形態 12 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 19 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 11 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 953$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 3.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 1.15$ 、 $A = 1.82$ 、 $B = 1.97$ 、 $C = 2.06$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タantalのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.893399$ 、 $\phi_2 = 1.26984$ とすることによって波長 953 nm で反射率 3.0% とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 103.16$ nm / 145.85 nm / 163.26 nm / 157.87 nm / 176.72 nm / 165.08 nm / 184.79 nm で

ある。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1096.73 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 2140.93 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 8.74 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0055】

図19は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約4%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 962 nm から 1053 nm にわたって反射率は2.6%から5.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長 953 nm の設定反射率3.0%を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $2.0\% \sim 5.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 89 nm である。この波長帯域幅を設定波長 953 nm で割った値は約 0.093 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0056】

実施の形態13.

本発明の実施の形態13に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図20を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態9に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 4.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 1.09$ 、 $A = 1.80$ 、 $B = 1.98$ 、 $C = 2.05$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 は、 $\phi_1 = 0.922613$ 、 $\phi_2 = 1.26872$ とすることによって波長 980 nm で反射率 4.0% とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 104.86 \text{ nm} / 159.89 \text{ nm} / 173.16 \text{ nm} / 175.88 \text{ nm} / 190.48 \text{ nm} / 182.99 \text{ nm} / 198.17 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1185.43 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 2211.73 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 9.03 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制することができる。

【0057】

図20は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約5%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、反射率は 3.7% から 6.0% の範囲内に収まっている。また、波長 980 nm の設定反射率 4.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $3.0\% \sim 6.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 190 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.093 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0058】

実施の形態14.

本発明の実施の形態14に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図21を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態13に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 912 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 4.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 1.09$ 、 $A = 1.80$ 、 $B = 1.98$ 、 $C = 2.05$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.922613$ 、 $\phi_2 = 1.26872$ とすることによって波長 912 nm で反射率 4.0% とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 97.58 \text{ nm} / 148.80 \text{ nm} / 161.15 \text{ nm} / 163.68 \text{ nm} / 177.26 \text{ nm} / 170.29 \text{ nm} / 184.42 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1103.18 nm である。それぞれの膜の

屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2059.26 nmであり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 8.41 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0059】

図 21 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、目標反射率の約 5 % 前後の平坦部分幅広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 891 nm から 1069 nm にわたって反射率は 3.7 % から 6.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 912 nm の設定反射率 4.0 % を基準として、-1.0 % から +2.0 % の範囲、即ち、3.0 % ~ 6.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 178 nm である。この波長帯域幅を設定波長 912 nm で割った値は約 0.195 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0060】

実施の形態 15.

本発明の実施の形態 15 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 22 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 9 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 5.0 % としている点で相違する。また、パラメータは $O = 1.13$ 、 $A = 1.76$ 、 $B = 1.98$ 、 $C = 2.06$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.0252$ 、 $\phi_2 = 1.18958$ とすることによって波長 980 nm で反射率 5.0 % とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 101.93$ nm / 173.72 nm / 158.75 nm / 195.44 nm / 178.60 nm / 203.33 nm / 185.81 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1103.18 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2213.24 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 9.03 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0061】

図 22 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、目標反射率の約 6 % 前後の平坦部分幅広い波長帯域にわたって得られている。即ち、反射率は 4.7 % から 7.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の設定反射率 5.0 % を基準として、-1.0 % から +2.0 % の範囲、即ち、4.0 % ~ 7.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 190 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.194 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0062】

実施の形態 16.

本発明の実施の形態 16 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 23 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 15 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 910$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 5.0 % としている点で相違する。また、パラメータは $O = 1.13$ 、 $A = 1.76$ 、 $B = 1.98$ 、 $C = 2.06$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.0252$ 、 $\phi_2 = 1.18958$ とすることによって波長 910 nm で反射率 5.0 % とすることができる。それに伴って、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 94.65$ nm / 161.31 nm / 147.41 nm / 181.48 nm / 165.84 nm / 188.81 nm / 172.54 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1112.04 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2055.16 nm である。

あり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 8.39 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0063】

図 23 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、目標反射率の約 6 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 891 nm から 1068 nm にわたって反射率は 4.7 % から 7.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 910 nm の設定反射率 5.0 % を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $4.0\% \sim 7.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 177 nm である。この波長帯域幅を設定波長 910 nm で割った値は約 0.195 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0064】

以下に、実施の形態 1 から実施の形態 16 に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表 1 に示した。表 1 には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 λ 及び設定反射率 $R(\lambda)$ 、極小反射率、 $\sum n_i d_i$ 及び所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (245 nm) との対比、 $R(\lambda)$ の $-1.0 \sim +2.0\%$ の範囲となる波長帯域幅 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\lambda/\lambda$ について示した。

【0065】

【表 1】

表 1

実施の形態	多層反射膜の特性					
	多層反射膜の構成	設定波長 λ 設定反射率 $R(\lambda)$	極小反射率	$\sum n_i d_i$ 、 波長 980nm の 1/4 波長 (245nm) と の対比	$R(\lambda)$ の -1.0~2.0% となる波長 帯域 $\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$
1	7 層膜	980nm 2 %	1.3%	1590.57nm 6.49 倍	242nm	242/980= 0.246
2	7 層膜	879nm 2 %	1.3%	1426.66nm 5.82 倍	237nm	237/879= 0.270
3	7 層膜	980nm 3 %	2.5%	1330.83nm 5.43 倍	173nm	173/980= 0.177
4	7 層膜	1035nm 3 %	2.5%	1405.57nm 5.74 倍	183nm	183/1035= 0.177
5	7 層膜	980nm 4 %	3.5%	1323.92nm 5.40 倍	178nm	178/980= 0.182
6	7 層膜	1040nm 4 %	3.5%	1405.95nm 5.73 倍	189nm	189/1040= 0.182
7	7 層膜	980nm 5 %	4.6%	1391.41nm 5.38 倍	170nm	170/980= 0.173
8	7 層膜	1035nm 5 %	4.6%	1391.41nm 5.68 倍	170nm	170/1035= 0.164
9	7 層膜	980nm 2 %	1.5%	2174.63nm 8.88 倍	157nm	157/980= 0.160
10	7 層膜	908nm 2 %	1.5%	2014.81nm 8.22 倍	145nm	145/908= 0.160
11	7 層膜	980nm 3 %	2.6%	2201.59nm 8.99 倍	91nm	91/980= 0.093
12	7 層膜	953nm 3 %	2.6%	2140.93nm 8.74 倍	89nm	89/953= 0.093
13	7 層膜	980nm 4 %	3.7%	2211.73nm 9.03 倍	190nm	190/980= 0.194
14	7 層膜	912nm 4 %	3.7%	2059.26nm 8.41 倍	178nm	178/912= 0.195
15	7 層膜	980nm 5 %	4.7%	2213.24nm 9.03 倍	190nm	190/980= 0.194
16	7 層膜	910nm 5 %	4.7%	2055.16nm 8.39 倍	177nm	177/910= 0.195

【0066】

実施の形態 17.

本発明の実施の形態 17 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について図 24 及び図 25 を用いて説明する。図 24 は、半導体光素子の端面部の反射膜として、単層反射膜に代えて 6 層反射膜 40 を設けた場合の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子は、実施の形態 1 に係る半導体光素子と比較すると、多層反射膜が 6 層反射膜 40 で構成されている点で相違する。この 6 層反射膜 40 の反射率が所定波長で前記仮想単層膜の反射率と同一に設定する条件について検討する。6 層反射膜 40 の場合にも上記 7 層反射膜と同様に、振幅反射率は下記式 (13) で表される。

【数 1 4】

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12})n_c - (m_{21} + m_{22})}{(m_{11} + m_{12})n_c + (m_{21} + m_{22})} \quad (13)$$

【0067】

ここで、 m_{ij} (i, j は 1 又は 2) は下記式 (14) で表される。

【数 1 5】

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos A\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin A\phi_1 \\ -in_1 \sin A\phi_1 & \cos A\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -in_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -in_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos C\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin C\phi_1 \\ -in_1 \sin C\phi_1 & \cos C\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos C\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin C\phi_2 \\ -in_2 \sin C\phi_2 & \cos C\phi_2 \end{pmatrix} \quad (14)$$

なお、 A, B, C は、第 1 層膜 31 の膜厚 Ad_1 、第 2 層膜 32 の膜厚 Ad_2 、第 3 層膜 33 の膜厚 Bd_1 、第 4 層膜 34 の膜厚 Bd_2 、第 5 層膜 35 の膜厚 Cd_1 、第 6 層膜 36 の膜厚 Cd_2 とした場合の、それぞれの 2 層膜 (ペア) の寄与率を表すパラメータである。

【0068】

以下、半導体光素子の端面部に 6 層反射膜 40 を設けた場合について説明する。図 24 は、端面部に設けた 6 層反射膜 40 の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子では、導波層 10 (等価屈折率 $n_c = 3.37$) の端面部に順に、酸化タンタルの第 1 層膜 31 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 Ad_1)、アルミナの第 2 層膜 32 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 Ad_2)、酸化タンタルの第 3 層膜 33 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 Bd_1)、アルミナの第 4 層膜 34 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 Bd_2)、酸化タンタルの第 5 層膜 35 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 Cd_1)、アルミナの第 6 層膜 36 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 Cd_2) が積層されている。さらに、この 6 層反射膜 40 は、空気等の自由空間 5 に接している。

【0069】

この半導体光素子の端面部の 6 層反射膜 40 の反射特性について説明する。まず、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 2% とする。各パラメータを、 $A = 2.0$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 0.792828$ 、 $\phi_2 = 0.715471$ である場合に反射率 2% が得られる。この場合、6 層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 = 120.23 \text{ nm} / 137.77 \text{ nm} / 120.23 \text{ nm} / 137.77 \text{ nm} / 120.23 \text{ nm} / 137.77 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 774.0 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1411.50 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 5.76 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0070】

図 25 は、この 6 層反射膜 40 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、目標反射率の 3% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 877 nm から 1017 nm にわたって反射率は極小値の 1.4% から 4.0% の範囲内に収まっている。また、所定波長 980 nm の反射率 2.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、

1. 0%~4.0%の範囲の連続した波長帯域幅は140nmである。この波長帯域幅を所定波長980nmで割った値は約0.143であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0071】

実施の形態18.

本発明の実施の形態18に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図26を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態17に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1014\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を2.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 2.0$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タングスタのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.792828$ 、 $\phi_2 = 0.715471$ とすることによって波長1014nmで反射率2.0%とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 124.40\text{ nm} / 142.55\text{ nm} / 124.40\text{ nm} / 142.55\text{ nm} / 124.40\text{ nm} / 142.55\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は800.85nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1460.47nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.96倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0072】

図26は、この6層反射膜40の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、目標反射率の約3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長907nmから1053nmにわたって反射率は1.4%から4.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1014nmの設定反射率2.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、1.0%~4.0%の範囲の連続した波長帯域幅は146nmである。この波長帯域幅を設定波長1014nmで割った値は約0.144であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この6層反射膜40は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0073】

実施の形態19.

本発明の実施の形態19に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図27を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態17に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を3.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.94$ 、 $B = 1.90$ 、 $C = 2.2$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タングスタのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.948585$ 、 $\phi_2 = 0.476939$ とすることによって波長980nmで反射率3.0%とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 139.54\text{ nm} / 89.08\text{ nm} / 136.66\text{ nm} / 87.25\text{ nm} / 158.24\text{ nm} / 101.02\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は711.79nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1342.95nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.48倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0074】

図27は、この6層反射膜40の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、目標反射率の約4%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長806nmから1009nmにわたって反射率は2.3%から5.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの設定反射率3.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、2

． 0%～5.0%の範囲の連続した波長帯域幅は203nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.207であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この6層反射膜40は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0075】

実施の形態20.

本発明の実施の形態20に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図28を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態19に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1052\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を3.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.94$ 、 $B = 1.90$ 、 $C = 2.2$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タantalのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.948585$ 、 $\phi_2 = 0.476939$ とすることによって波長1052nmで反射率3.0%とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 = 150.64\text{ nm} / 96.17\text{ nm} / 147.54\text{ nm} / 94.19\text{ nm} / 170.83\text{ nm} / 109.06\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は768.43nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1449.81nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.92倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0076】

図28は、この6層反射膜40の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、目標反射率の約4%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、反射率は2.3%から5.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1052nmの設定反射率3.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、2.0%～5.0%の範囲の連続した波長帯域幅は218nmである。この波長帯域幅を設定波長1052nmで割った値は約0.207であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この6層反射膜40は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0077】

実施の形態21.

本発明の実施の形態21に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図29を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態17に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を4.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.94$ 、 $B = 1.90$ 、 $C = 2.2$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タantalのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.98561$ 、 $\phi_2 = 0.417545$ とすることによって波長980nmで反射率4.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 = 144.98\text{ nm} / 77.99\text{ nm} / 141.99\text{ nm} / 76.38\text{ nm} / 164.41\text{ nm} / 188.44\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は794.19nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1483.84nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.06倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0078】

図29は、この6層反射膜40の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、目標反射率の約5%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長791nmから1020nmにわたって反射率は3.3%から6.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの設定反射率4.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、3.0%～6.0%の範囲の連続した波長帯域幅は229nmである。この波長帯域幅を設

定波長 980 nm で割った値は約 0.234 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 6 層反射膜 40 は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0079】

実施の形態 22.

本発明の実施の形態 22 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 30 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 21 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1075$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 4.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.94$ 、 $B = 1.90$ 、 $C = 2.2$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タantalのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.98561$ 、 $\phi_2 = 0.417545$ とすることによって波長 1075 nm で反射率 4.0% とすることができる。この場合、6 層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 159.04$ nm / 85.55 nm / 155.76 nm / 83.79 nm / 180.35 nm / 97.02 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 761.51 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1450.03 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245$ nm) の約 5.92 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0080】

図 30 は、この 6 層反射膜 40 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、目標反射率の約 5% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 854 nm から 1105 nm にわたって反射率は 3.3% から 6.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1075 nm の設定反射率 4.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $3.0\% \sim 6.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 251 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1075 nm で割った値は約 0.233 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 6 層反射膜 40 は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0081】

実施の形態 23.

本発明の実施の形態 23 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 31 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 17 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 5.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 2.04$ 、 $B = 1.92$ 、 $C = 2.2$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タantalのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.93793$ 、 $\phi_2 = 0.433879$ とすることによって波長 980 nm で反射率 5.0% とすることができる。この場合、6 層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 145.08$ nm / 85.22 nm / 136.55 nm / 80.21 nm / 156.46 nm / 91.90 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 695.42 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1318.03 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245$ nm) の約 5.38 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0082】

図 31 は、この 6 層反射膜 40 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、目標反射率の約 6% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 787 nm から 1009 nm にわたって反射率は 4.6% から 7.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の設定反射率 5.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $4.0\% \sim 7.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 222 nm である。この波長帯域幅を設

定波長 980 nm で割った値は約 0.227 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 6 層反射膜 40 は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0083】

実施の形態 24.

本発明の実施の形態 24 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 32 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 23 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1069 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 5.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 2.04$ 、 $B = 1.92$ 、 $C = 2.2$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タantalのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.93793$ 、 $\phi_2 = 0.433879$ とすることによって波長 1069 nm で反射率 5.0% とすることができる。この場合、6 層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 158.26 \text{ nm} / 92.96 \text{ nm} / 148.95 \text{ nm} / 87.49 \text{ nm} / 170.67 \text{ nm} / 100.25 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 758.58 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1437.73 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 5.87 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0084】

図 32 は、この 6 層反射膜 40 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、目標反射率の約 6% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 858 nm から 1101 nm にわたって反射率は 4.6% から 7.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1069 nm の設定反射率 5.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $4.0\% \sim 7.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 243 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1069 nm で割った値は約 0.227 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 6 層反射膜 40 は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0085】

以下に、実施の形態 17 から実施の形態 24 に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表 2 に示した。表 2 には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 λ 及び設定反射率 $R(\lambda)$ 、極小反射率、 $\sum n_i d_i$ 及び所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (245 nm) との対比、 $R(\lambda)$ の $-1.0 \sim +2.0\%$ の範囲となる波長帯域幅 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\lambda/\lambda$ について示した。

【0086】

【表 2】

表 2

実施の形態	多層反射膜の特性					
	多層反射膜の構成	設定波長 λ 設定反射率 $R(\lambda)$	極小反射率	$\Sigma n_i d_i$ 、 波長 980nm の 1/4 波長 (245nm) と の対比	$R(\lambda)$ の -1.0~2.0% となる波長 帯域 $\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$
17	6 層膜	980nm 2 %	1.4%	1411.50nm 5.76 倍	140nm	140/980= 0.143
18	6 層膜	1014nm 2 %	1.4%	1460.47nm 5.96 倍	146nm	146/1014= 0.144
19	6 層膜	980nm 3 %	2.3%	1342.95nm 5.48 倍	203nm	203/980= 0.207
20	6 層膜	1014nm 3 %	2.3%	1449.81nm 5.92 倍	218nm	218/1014= 0.207
21	6 層膜	980nm 4 %	3.3%	1483.84nm 6.06 倍	229nm	229/980= 0.234
22	6 層膜	1075nm 4 %	3.3%	1450.03nm 5.92 倍	251nm	251/1075= 0.233
23	6 層膜	980nm 5 %	4.6%	1318.03nm 5.38 倍	222nm	222/980= 0.227
24	6 層膜	1069nm 5 %	4.6%	1437.73nm 5.87 倍	243nm	243/1069= 0.164

【0087】

実施の形態 25.

本発明の実施の形態 25 に係る 3 種類の膜を含む 7 層反射膜を備えた半導体光素子について図 33 及び図 34 を用いて説明する。図 33 は、半導体光素子の端面部の反射膜として、単層反射膜に代えて 3 種類の膜からなる 7 層反射膜 50 を設けた場合の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子は、実施の形態 1 に係る半導体光素子と比較すると、多層反射膜が 3 種類の膜からなる 7 層反射膜 50 で構成されている点で相違する。さらに詳細には、導波層 10 に接する第 1 層膜が窒化アルミニウム膜 41 である点で相違する。なお、第 2 層膜から第 7 層膜にかけては酸化タンタル及びアルミナが交互に積層されている点で共通する。

【0088】

この 3 種類の膜を含む 7 層反射膜 50 の反射率が所定波長で上記仮想単層膜の反射率と同一に設定する条件について検討する。ここでは、導波層 10 に接する第 1 層膜に第 3 の種類の膜を用いた場合について検討する。この第 3 の膜の位相変化 ϕ_3 は、下記式 (15) で表される。

【数 16】

$$\phi_3 = \frac{2\pi}{\lambda} n_3 d_3 \quad (15)$$

【0089】

そこで、この 3 種類の膜からなる 7 層反射膜 50 の振幅反射率は、上記 7 層反射膜、6 層反射膜と同様に下記式 (16) で表される。

【数 17】

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12})n_c - (m_{21} + m_{22})}{(m_{11} + m_{12})n_c + (m_{21} + m_{22})} \quad (16)$$

【0090】

ここで、 m_{ij} (i, j は 1 又は 2) は下記式 (17) で表される。

【数 18】

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi_3 & -\frac{i}{n_3} \sin \phi_3 \\ -in_3 \sin \phi_3 & \cos \phi_3 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos A\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin A\phi_1 \\ -in_1 \sin A\phi_1 & \cos A\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -in_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -in_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos C\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin C\phi_1 \\ -in_1 \sin C\phi_1 & \cos C\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos C\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin C\phi_2 \\ -in_2 \sin C\phi_2 & \cos C\phi_2 \end{pmatrix} \quad (17)$$

なお、A、B、C は、第 2 層膜 42 の膜厚 Ad_1 、第 3 層膜 43 の膜厚 Ad_2 、第 4 層膜 44 の膜厚 Bd_1 、第 5 層膜 45 の膜厚 Bd_2 、第 6 層膜 46 の膜厚 Cd_1 、第 7 層膜 47 の膜厚 Cd_2 とした場合の、それぞれの 2 層膜 (ペア) の寄与率を表すパラメータである。

【0091】

以下、半導体光素子の端面部に 3 種類の膜を含む 7 層反射膜 50 を設けた場合について説明する。図 33 は、端面部に設けた 3 種類の膜を含む 7 層反射膜の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子では、導波層 10 (等価屈折率 $n_c = 3.37$) の端面部に順に、窒化アルミニウム (AlN) の第 1 層膜 41 (屈折率 $n_3 = 2.072$ 、膜厚 $d_3 = 50 \text{ nm}$)、酸化タンタルの第 2 層膜 42 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 Ad_1)、アルミナの第 3 層膜 43 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 Ad_2)、酸化タンタルの第 4 層膜 44 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 Bd_1)、アルミナの第 5 層膜 45 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 Bd_2)、酸化タンタルの第 6 層膜 46 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 Cd_1)、アルミナの第 7 層膜 47 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 Cd_2) が積層されている。さらに、この 7 層反射膜 50 は、空気等の自由空間 5 に接している。

【0092】

まず、窒化アルミニウム、酸化タンタル、アルミナの 3 種類の膜を含む 7 層反射膜の熱特性について説明する。この 3 種類の膜の熱伝導率は、順に、約 $1.8 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ 、約 $0.1 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ 、約 $0.2 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ なので、窒化アルミニウムが最も熱伝導率が高い。このため導波層 10 の熱を迅速に外部に放熱させることができる。

【0093】

次に、この半導体光素子の端面部の 3 種類の膜を含む 7 層反射膜 50 の反射特性について説明する。まず、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 2.0% とする。各パラメータを、 $A = 1.0$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 1.23574$ 、 $\phi_2 = 0.727856$ である場合に波長 980 nm で反射率 2% が得られる。なお、窒化アルミニウムの第 1 層膜 41 の厚み d_3 は予め 50 nm として、 ϕ_3 は既知の定数として用い、変数には ϕ_1 及び ϕ_2 のみを用いた。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 = 50 \text{ nm} / 93.7 \text{ nm} / 70.08 \text{ nm} / 18$

7.40 nm/140.15 nm/187.40 nm/140.15 nmである。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は868.88 nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1634.92 nmであり、 $\lambda/4$ ($=245$ nm) の約6.67倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0094】

図34は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長952 nmから1194 nmにわたって反射率は極小値の1.6%から4.0%の範囲内に収まっている。また、所定波長980 nmの反射率2.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、1.0%~4.0%の範囲の連続した波長帯域幅は242 nmである。この波長帯域幅を所定波長980 nmで割った値は約0.247であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0095】

実施の形態26.

本発明の実施の形態26に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図35を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 897$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を2.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.0$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.23574$ 、 $\phi_2 = 0.727856$ とすることによって波長897 nmで反射率2.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50/83.26$ nm/65.10 nm/166.52 nm/130.20 nm/166.52 nm/130.20 nmである。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は791.8 nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1487.24 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長 ($=245$ nm) の約6.07倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0096】

図35は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長872 nmから1086 nmにわたって反射率は1.5%から4.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長897 nmの設定反射率2.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、1.0%~4.0%の範囲の連続した波長帯域幅は214 nmである。この波長帯域幅を設定波長897 nmで割った値は約0.239であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜50は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0097】

実施の形態27.

本発明の実施の形態27に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図36を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 980$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を3.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.0$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.20275$ 、 $\phi_2 = 0.765599$ とすることによって波長980 nmで反射率3.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50/91.20$ nm/73.71 nm/1

82.40 nm / 147.42 nm / 182.40 nm / 147.42 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 874.55 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1638.64 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245$ nm) の約 6.69 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0098】

図 36 は、この 3 種類の膜を含む 7 層反射膜 50 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、目標反射率の約 4 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 953 nm から 1195 nm にわたって反射率は 2.6 % から 5.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の設定反射率 3.0 % を基準として、 -1.0 % から $+2.0$ % の範囲、即ち、 2.0 % ~ 5.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 242 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.247 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 7 層反射膜 50 は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0099】

実施の形態 28.

本発明の実施の形態 28 に係る 3 種類の膜を含む 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 37 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 27 と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 896$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 3.0 % としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.0$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.23574$ 、 $\phi_2 = 0.727856$ とすることによって波長 896 nm で反射率 3.0 % とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 50 / 81.08$ nm / 68.15 nm / 162.16 nm / 136.31 nm / 162.16 nm / 136.31 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 796.17 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1489.56 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245$ nm) の約 6.08 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0100】

図 37 は、この 3 種類の膜を含む 7 層反射膜 50 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、目標反射率の約 4 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 872 nm から 1089 nm にわたって反射率は 2.5 % から 5.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 896 nm の設定反射率 3.0 % を基準として、 -1.0 % から $+2.0$ % の範囲、即ち、 2.0 % ~ 5.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 217 nm である。この波長帯域幅を設定波長 896 nm で割った値は約 0.242 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 7 層反射膜 50 は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0101】

実施の形態 29.

本発明の実施の形態 29 に係る 3 種類の膜を含む 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 38 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 25 と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 4.0 % としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.0$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.17459$ 、 $\phi_2 = 0.798874$ とすることによって波長 980 nm で反射率 4.0 % とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 50 / 89.06$ nm / 76.91 nm / 1

78.13 nm/153.83 nm/178.13 nm/153.83 nmである。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は879.89 nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1642.63 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長 (=245 nm) の約6.70倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0102】

図38は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約5%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長953 nmから1198 nmにわたって反射率は3.6%から6.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの設定反射率4.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、3.0%~6.0%の範囲の連続した波長帯域幅は245 nmである。この波長帯域幅を設定波長980 nmで割った値は約0.250であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜50は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0103】

実施の形態30.

本発明の実施の形態30に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図39を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態29に係る半導体光素子と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 893$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を4.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A=1.0$ 、 $B=2.0$ 、 $C=2.0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タantalのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.14262$ 、 $\phi_2 = 0.805876$ とすることによって波長893 nmで反射率4.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50/78.95$ nm/ 70.70 nm/ 157.90 nm/ 141.40 nm/ 157.90 nm/ 141.40 nmである。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は798.25 nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1488.27 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長 (=245 nm) の約6.07倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0104】

図39は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約5%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長870 nmから1090 nmにわたって反射率は3.4%から6.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長893 nmの設定反射率4.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、3.0%~6.0%の範囲の連続した波長帯域幅は220 nmである。この波長帯域幅を設定波長893 nmで割った値は約0.246であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜50は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0105】

実施の形態31.

本発明の実施の形態31に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図40を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 980$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を5.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A=1.0$ 、 $B=2.0$ 、 $C=2.0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タantalのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.14888$ 、 $\phi_2 = 0.829916$ とすることによって波長980 nmで反射率5.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50/87.11$ nm/ 79.90 nm/ 1

74.23 nm/159.81 nm/174.23 nm/159.81 nmである。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は885.09 nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1646.79 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長 (=245 nm) の約6.72倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0106】

図40は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長952 nmから1201 nmにわたって反射率は4.6%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの設定反射率5.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、4.0%~7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は249 nmである。この波長帯域幅を設定波長980 nmで割った値は約0.254であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜50は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0107】

実施の形態32.

本発明の実施の形態32に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図41を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態31と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 890$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を5.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.0$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タantalのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.11792$ 、 $\phi_2 = 0.835299$ とすることによって波長890 nmで反射率5.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50/76.98 \text{ nm}/73.04 \text{ nm}/153.96 \text{ nm}/146.07 \text{ nm}/153.96 \text{ nm}/146.07 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は800.08 nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1486.93 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長 (=245 nm) の約6.07倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0108】

図41は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長867 nmから1093 nmにわたって反射率は4.4%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長890 nmの設定反射率5.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、4.0%~7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は226 nmである。この波長帯域幅を設定波長890 nmで割った値は約0.254であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜50は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0109】

以下に、実施の形態25から実施の形態32に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表3に示した。表3には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 λ 及び設定反射率 $R(\lambda)$ 、極小反射率、 $\sum n_i d_i$ 及び所定波長980 nmの1/4波長 (245 nm) との対比、 $R(\lambda)$ の-1.0~+2.0%の範囲となる波長帯域幅 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\lambda/\lambda$ について示した。

【0110】

【表 3】

表 3

実施 の 形態	多層反射膜の特性					
	多層反射膜 の構成	設定波長 λ 設定反射率 $R(\lambda)$	極小反 射率	$\Sigma n_i d_i$ 、 波長 980nm の 1/4 波長 (245nm) と の対比	$R(\lambda)$ の -1.0~2.0% となる波長 帯域 $\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$
25	7 層膜 (3 種類)	980nm 2 %	1.6%	1634.92nm 6.67 倍	242nm	242/980= 0.247
26	7 層膜 (3 種類)	897nm 2 %	1.5%	1487.24nm 6.07 倍	214nm	214/897= 0.239
27	7 層膜 (3 種類)	980nm 3 %	2.6%	1638.64nm 6.69 倍	242nm	242/980= 0.247
28	7 層膜 (3 種類)	896nm 3 %	2.5%	1489.56nm 6.08 倍	217nm	217/896= 0.242
29	7 層膜 (3 種類)	980nm 4 %	3.6%	1642.63nm 6.70 倍	245nm	245/980= 0.250
30	7 層膜 (3 種類)	893nm 4 %	3.4%	1488.27nm 6.07 倍	220nm	220/893= 0.246
31	7 層膜 (3 種類)	980nm 5 %	4.6%	1646.79nm 6.72 倍	249nm	249/980= 0.254
32	7 層膜 (3 種類)	890nm 5 %	4.4%	1486.93nm 6.07 倍	226nm	226/890= 0.254

【0111】

実施の形態 33.

本発明の実施の形態 33 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について図 42 及び 43 を用いて説明する。図 42 は、半導体光素子の端面部の反射膜として、単層反射膜に代えて 9 層反射膜 60 を設けた場合の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子は、実施の形態 1 に係る半導体光素子と比較すると、多層反射膜が 9 層反射膜 60 で構成されている点で相違する。この 9 層反射膜 60 の反射率が所定波長で前記仮想単層膜の反射率と同一にする条件について検討する。9 層反射膜 60 の振幅反射率は、上記 4 層反射膜及び 7 層反射膜と同様に下記式 (18) で表される。

【数 19】

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12})n_c - (m_{21} + m_{22})}{(m_{11} + m_{12})n_c + (m_{21} + m_{22})} \quad (18)$$

【0112】

ここで、 m_{ij} (i, j は 1 又は 2) は下記式 (19) で表される。

【数 20】

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos O\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin O\phi_2 \\ -in_2 \sin O\phi_2 & \cos O\phi_2 \end{pmatrix} \\
 \times \begin{pmatrix} \cos A\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin A\phi_1 \\ -in_1 \sin A\phi_1 & \cos A\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -in_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\
 \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -in_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \\
 \times \begin{pmatrix} \cos C\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin C\phi_1 \\ -in_1 \sin C\phi_1 & \cos C\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos C\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin C\phi_2 \\ -in_2 \sin C\phi_2 & \cos C\phi_2 \end{pmatrix} \\
 \times \begin{pmatrix} \cos D\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin D\phi_1 \\ -in_1 \sin D\phi_1 & \cos D\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos D\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin D\phi_2 \\ -in_2 \sin D\phi_2 & \cos D\phi_2 \end{pmatrix} \quad (19)$$

なお、O、A、B、C、Dは、第1層膜51の膜厚 $O d_2$ 、第2層膜52の膜厚 $A d_1$ 、第3層膜63の膜厚 $A d_2$ 、第4層膜54の膜厚 $B d_1$ 、第5層膜55の膜厚 $B d_2$ 、第6層膜56の膜厚 $C d_1$ 、第7層膜57の膜厚 $C d_2$ 、第8層膜58の膜厚 $D d_1$ 、第9層膜59の膜厚 $D d_2$ において、第1層膜31を除き、それぞれの2層膜（ペア）の寄与率を表すパラメータである。

【0113】

以下、半導体光素子の端面部に9層反射膜60を設けた場合について説明する。図42は、端面部に設けた9層反射膜の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子では、導波層10（等価屈折率 $n_c = 3.37$ ）の端面部に順に、アルミナの第1層膜51（屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $O d_2$ ）、酸化タantalの第2層膜52（屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 $A d_1$ ）、アルミナの第3層膜53（屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $A d_2$ ）、酸化タantalの第4層膜54（屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 $B d_1$ ）、アルミナの第5層膜55（屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $B d_2$ ）、酸化タantalの第6層膜56（屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 $C d_1$ ）、アルミナの第7層膜57（屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $C d_2$ ）、酸化タantalの第8層膜58（屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 $C d_1$ ）、アルミナの第9層膜59（屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $C d_2$ ）が積層されている。さらに、この9層反射膜60は、空気等の自由空間5に接している。

【0114】

この半導体光素子の端面部の9層反射膜60の反射特性について説明する。まず、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を2%とする。各パラメータを、 $O = 0.2$ 、 $A = 2.7$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ 、 $D = 2.0$ とした場合、酸化タantal及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 0.35769$ 、 $\phi_2 = 0.958077$ である場合に波長 980 nm で反射率2%が得られる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 18.45 \text{ nm} / 73.23 \text{ nm} / 249.06 \text{ nm} / 54.24 \text{ nm} / 184.49 \text{ nm} / 54.24 \text{ nm} / 184.49 \text{ nm} / 54.24 \text{ nm} / 184.49 \text{ nm}$ である。全体の膜厚（ $d_{\text{total}} = \sum d_i$ ）は 1056.93 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1815.34 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長（ $= 245 \text{ nm}$ ）の約7.41倍と非常に厚い。この

ため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0115】

図43は、この9層反射膜60の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、目標反射率の3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長877nmから1007nmにわたって反射率は極小値の1.6%から4.0%の範囲内に収まっている。また、所定波長980nmの反射率2.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、1.0%~4.0%の範囲の連続した波長帯域幅は130nmである。この波長帯域幅を所定波長980nmで割った値は約0.133であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この9層反射膜60は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0116】

実施の形態34.

本発明の実施の形態34に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図44を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態33と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 1020\text{nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を2.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.2$, $A = 2.7$, $B = 2.0$, $C = 2.0$, $D = 2.0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.35769$, $\phi_2 = 0.958077$ とすることによって波長1020nmで反射率2.0%とすることができる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 19.20\text{nm} / 76.22\text{nm} / 259.22\text{nm} / 56.46\text{nm} / 192.02\text{nm} / 56.46\text{nm} / 192.02\text{nm} / 56.46\text{nm} / 192.02\text{nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}} = \sum d_i$)は1100.08nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1889.46nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約7.71倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0117】

図44は、この9層反射膜60の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、目標反射率の約3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長912nmから1048nmにわたって反射率は1.6%から4.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1020nmの設定反射率2.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、1.0%~4.0%の範囲の連続した波長帯域幅は136nmである。この波長帯域幅を設定波長1020nmで割った値は約0.133であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この9層反射膜60は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0118】

実施の形態35.

本発明の実施の形態35に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図45を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態33に係る半導体光素子と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 980\text{nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を3.0%としている点で相違する。また、各パラメータを、 $O = 0.2$, $A = 2.7$, $B = 2.0$, $C = 2.0$, $D = 2.0$ とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 0.377348$, $\phi_2 = 0.935416$ である場合に波長980nmで反射率3%が得られる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 18.01\text{nm} / 77.25\text{nm} / 243.16\text{nm} / 57.22\text{nm} / 180.12\text{nm} / 57.22\text{nm} / 180.12\text{nm} / 57.22\text{nm} / 180.12\text{nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}} = \sum d_i$)は1050.44nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i

i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1810.49 nmであり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 7.49 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0119】

図 45 は、この 9 層反射膜 60 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、目標反射率の 4 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 882 nm から 1007 nm にわたって反射率は極小値の 2.6 % から 5.0 % の範囲内に収まっている。また、所定波長 980 nm の反射率 3.0 % を基準として、-1.0 % から +2.0 % の範囲、即ち、2.0 % ~ 5.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 125 nm である。この波長帯域幅を所定波長 980 nm で割った値は約 0.128 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 9 層反射膜 60 は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0120】

実施の形態 36.

本発明の実施の形態 36 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 46 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 35 に係る半導体光素子と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 1017$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 3.0 % としている点で相違する。また、各パラメータを、 $O = 0.2$ 、 $A = 2.7$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ 、 $D = 2.0$ とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 0.377348$ 、 $\phi_2 = 0.935416$ である場合に波長 1017 nm で反射率 3 % が得られる。この場合、9 層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 18.69$ nm / 80.17 nm / 252.35 nm / 59.39 nm / 186.92 nm / 59.39 nm / 186.92 nm / 59.39 nm / 186.92 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1090.14 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1878.92 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 7.67 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0121】

図 46 は、この 9 層反射膜 60 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、目標反射率の 4 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 915 nm から 1045 nm にわたって反射率は極小値の 2.6 % から 5.0 % の範囲内に収まっている。また、所定波長 1017 nm の反射率 3.0 % を基準として、-1.0 % から +2.0 % の範囲、即ち、2.0 % ~ 5.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 130 nm である。この波長帯域幅を所定波長 1017 nm で割った値は約 0.128 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 9 層反射膜 60 は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0122】

実施の形態 37.

本発明の実施の形態 37 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 47 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 33 に係る半導体光素子と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 4.0 % としている点で相違する。また、各パラメータを、 $O = 0.15$ 、 $A = 2.8$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ 、 $D = 2.0$ とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 0.38725$ 、 $\phi_2 = 0.911369$ である場合に波長 980 nm で反射率 4 % が得られる。この場合、9 層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 13.16$ nm / 82.22 nm / 245.69 nm / 58.73 nm / 175.49 nm / 58.73 nm

／175.49 nm／58.73 nm／175.49 nmである。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は1043.73 nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1803.77 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長 (=245 nm) の約7.36倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0123】

図47は、この9層反射膜60の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、目標反射率の5%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長883 nmから1006 nmにわたって反射率は極小値の3.6%から6.0%の範囲内に収まっている。また、所定波長980 nmの反射率4.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、3.0%～6.0%の範囲の連続した波長帯域幅は123 nmである。この波長帯域幅を所定波長980 nmで割った値は約0.126であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0124】

実施の形態38.

本発明の実施の形態38に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図48を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態37に係る半導体光素子と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 1017$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を4.0%としている点で相違する。また、各パラメータを、 $O = 0.15$ 、 $A = 2.8$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ 、 $D = 2.0$ とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 0.38725$ 、 $\phi_2 = 0.911369$ である場合に波長1017 nmで反射率4%が得られる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 13.66$ nm／85.32 nm／245.96 nm／60.94 nm／182.12 nm／60.94 nm／182.12 nm／60.94 nm／182.12 nmである。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は1083.12 nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1871.83 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長 (=245 nm) の約7.64倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0125】

図48は、この9層反射膜60の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、目標反射率の5%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長916 nmから1044 nmにわたって反射率は極小値の3.6%から6.0%の範囲内に収まっている。また、所定波長1017 nmの反射率4.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、3.0%～6.0%の範囲の連続した波長帯域幅は128 nmである。この波長帯域幅を所定波長1017 nmで割った値は約0.126であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0126】

実施の形態39.

本発明の実施の形態39に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図49を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態33に係る半導体光素子と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 980$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を5.0%としている点で相違する。また、各パラメータを、 $O = 0.10$ 、 $A = 2.9$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ 、 $D = 2.0$ とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 0.397519$ 、 $\phi_2 = 0.886992$ である場合に波長980 nmで反射率5%が得られる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 /$

$Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / Dd_1 / Dd_2 = 8.54 \text{ nm} / 87.41 \text{ nm} / 247.66 \text{ nm} / 60.28 \text{ nm} / 170.80 \text{ nm} / 60.28 \text{ nm} / 170.80 \text{ nm} / 60.28 \text{ nm} / 170.80 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 1036.85 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1801.04 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 7.35 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0127】

図49は、この9層反射膜60の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、目標反射率の約6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 890 nm から 1006 nm にわたって反射率は極小値の 4.6% から 7.0% の範囲内に収まっている。また、所定波長 980 nm の反射率 5.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $4.0\% \sim 7.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 116 nm である。この波長帯域幅を所定波長 980 nm で割った値は約 0.118 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0128】

実施の形態40.

本発明の実施の形態40に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図50を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態39に係る半導体光素子と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 1013 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 5.0% としている点で相違する。また、各パラメータを、 $O=0.10$ 、 $A=2.9$ 、 $B=2.0$ 、 $C=2.0$ 、 $D=2.0$ とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 0.397519$ 、 $\phi_2 = 0.886992$ である場合に波長 1013 nm で反射率 5% が得られる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $Od_2 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / Dd_1 / Dd_2 = 8.83 \text{ nm} / 90.35 \text{ nm} / 256.00 \text{ nm} / 62.31 \text{ nm} / 176.55 \text{ nm} / 62.31 \text{ nm} / 176.55 \text{ nm} / 62.31 \text{ nm} / 176.55 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 1071.76 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1857.42 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 7.58 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0129】

図50は、この9層反射膜60の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、目標反射率の6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 920 nm から 1040 nm にわたって反射率は極小値の 4.6% から 7.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1013 nm の反射率 5.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $4.0\% \sim 7.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅 $\Delta\lambda$ は 120 nm である。この波長帯域幅を設定波長 $\lambda = 1013 \text{ nm}$ で割った値は約 0.118 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0130】

以下に、実施の形態33から実施の形態40に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表4に示した。表4には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 λ 及び設定反射率 $R(\lambda)$ 、極小反射率、 $\sum n_i d_i$ 及び所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (245 nm) との対比、 $R(\lambda)$ の $-1.0 \sim +2.0\%$ の範囲となる波長帯域幅 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\lambda/\lambda$ について示した。

【0131】

【表 4】

表 4

実施の形態	多層反射膜の特性					
	多層反射膜の構成	設定波長 λ 設定反射率 $R(\lambda)$	極小反射率	$\Sigma n_i d_i$ 、 波長 980nm の 1/4 波長 (245nm) との 対比	$R(\lambda)$ の -1.0~2.0% となる波長 帯域 $\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$
33	9層膜	980nm 2%	1.4%	1815.34nm 7.41 倍	130nm	130/980= 0.133
34	9層膜	1020nm 2%	1.4%	1889.46nm 7.71 倍	136nm	136/1020= 0.133
35	9層膜	980nm 3%	2.6%	1810.49nm 7.49 倍	125nm	125/980= 0.128
36	9層膜	1017nm 3%	2.6%	1878.92nm 7.67 倍	130nm	130/1017= 0.128
37	9層膜	980nm 4%	3.6%	1803.77nm 7.36 倍	123nm	123/980= 0.126
38	9層膜	1017nm 4%	3.6%	1871.83nm 7.64 倍	128nm	128/1017= 0.126
39	9層膜	980nm 5%	4.6%	1801.04nm 7.35 倍	116nm	116/980= 0.118
40	9層膜	1013nm 5%	4.6%	1857.42nm 7.58 倍	120nm	120/1013= 0.118

【0132】

実施の形態 41.

本発明の実施の形態 3 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 51 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 1 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 6.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.15$ 、 $A = 1.95$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.845348$ 、 $\phi_2 = 0.578286$ とすることによって波長 980 nm で反射率 6.0%とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 8.35 \text{ nm} / 124.99 \text{ nm} / 108.57 \text{ nm} / 128.20 \text{ nm} / 111.35 \text{ nm} / 128.20 \text{ nm} / 111.35 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}} = \Sigma d_i$)は 721.01 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\Sigma n_i d_i$ は、1334.70 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長(= 245 nm)の約 5.45 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0133】

図 51 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、目標反射率の 7% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 828 nm から 1009 nm にわたって反射率は 5.4% から 8.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 6.0% を基準として、-1.0% から +2.0% の範囲、即ち、5.0% ~ 8.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 181 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.185 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.062 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0134】

実施の形態 42.

本発明の実施の形態 42 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 52 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 41 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1045 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 6.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.15$ 、 $A = 1.95$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.541022$ 、 $\phi_2 = 0.741397$ とすることによって波長 1045 nm で反射率 6.0% とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 8.91 \text{ nm} / 133.28 \text{ nm} / 115.77 \text{ nm} / 136.70 \text{ nm} / 118.74 \text{ nm} / 136.70 \text{ nm} / 118.74 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 768.84 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1423.24 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 5.81 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0135】

図 52 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、目標反射率の 7% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 883 nm から 1076 nm にわたって反射率は 5.4% から 8.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1045 nm の設定反射率 6.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、反射率 5.0% ~ 8.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 193 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1045 nm で割った値は約 0.185 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.062 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0136】

以下に、実施の形態 41 と実施の形態 42 とに係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表 5 に示した。表 5 には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 λ 及び設定反射率 $R(\lambda)$ 、極小反射率、 $\sum n_i d_i$ 及び所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (245 nm) との対比、 $R(\lambda)$ の $-1.0 \sim +2.0\%$ の範囲となる波長帯域幅 $\Delta \lambda$ 、 $\Delta \lambda / \lambda$ について示した。

【0137】

【表 5】

表 5

実施の形態	多層反射膜の特性					
	多層反射膜の構成	設定波長 λ 設定反射率 $R(\lambda)$	極小反射率	$\sum n_i d_i$ 、 波長 980 nm の $1/4$ 波長 (245 nm) との 対比	$R(\lambda)$ の $-1.0 \sim +2.0\%$ となる波長 帯域 $\Delta \lambda$	$\Delta \lambda / \lambda$
41	7 層膜	980 nm 6%	5.4%	1334.70 nm 5.45 倍	181 nm	$181/980 =$ 0.185
42	7 層膜	1045 nm 6%	5.4%	1423.24 nm 5.81 倍	193 nm	$193/1045 =$ 0.185

【0138】

実施の形態 43.

本発明の実施の形態 43 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 53 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 1 に係る半導体光素子と比較すると、設

定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を6.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.20$ 、 $A = 1.97$ 、 $B = 2.35$ 、 $C = 2.10$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.79703$ 、 $\phi_2 = 0.528684$ とすることによって波長 980 nm で反射率6.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 10.18 \text{ nm} / 119.06 \text{ nm} / 100.28 \text{ nm} / 145.02 \text{ nm} / 119.62 \text{ nm} / 126.91 \text{ nm} / 106.89 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}} = \sum d_i$)は 727.96 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1350.16 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長($= 245 \text{ nm}$)の約5.51倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0139】

図53は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 813 nm から 994 nm にわたって反射率は5.0%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率6.0%を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率4.5%~7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は 181 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約0.185である。

【0140】

ここで、比較のために導波光の所定波長 980 nm について $5/4$ 波長の厚さの仮想単層反射膜を仮定する。設定条件は、波長 980 nm で極小反射率4%をとるように、 $n_c = 3.37$ 、 $n_1 = 1.449$ である。この場合、極小反射率を基準として $+2.5\%$ 、すなわち反射率4%~6.5%の波長範囲は 949 nm ~ 1013 nm であり、その波長帯域幅は 64 nm である。この波長帯域幅の広さの目安として、導波光の所定波長 980 nm で割ると0.065が得られる。

【0141】

そこで、この実施の形態43に係る7層反射膜について、上記仮想単層反射膜と比較すると、導波光の波長での反射率 $+2.5\%$ となる波長帯域幅をその波長で割った商は、0.185であり、仮想単層反射膜の0.065よりはるかに大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって平坦部を有していることがわかる。

【0142】

実施の形態44.

本発明の実施の形態44に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図54を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態43に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1063 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を6.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.20$ 、 $A = 1.97$ 、 $B = 2.35$ 、 $C = 2.10$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.79703$ 、 $\phi_2 = 0.528684$ とすることによって波長 1063 nm で反射率6.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 11.04 \text{ nm} / 129.14 \text{ nm} / 108.77 \text{ nm} / 154.05 \text{ nm} / 129.75 \text{ nm} / 137.66 \text{ nm} / 115.95 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}} = \sum d_i$)は 786.36 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1457.82 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長($= 245 \text{ nm}$)の約5.95倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0143】

図54は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 882 nm から 1078 nm にわた

って反射率は5.0%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1063 nmの設定反射率6.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率4.5%~7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は196 nmである。この波長帯域幅を設定波長1063 nmで割った値は約0.184であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって平坦部を有していることがわかる。

【0144】

実施の形態45.

本発明の実施の形態45に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図55を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を7.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.17$ 、 $A = 1.97$ 、 $B = 2.35$ 、 $C = 2.05$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.80763$ 、 $\phi_2 = 0.525803$ とすることによって波長980 nmで反射率7.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 8.61 \text{ nm} / 120.64 \text{ nm} / 99.73 \text{ nm} / 143.91 \text{ nm} / 118.97 \text{ nm} / 125.54 \text{ nm} / 103.78 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}} = \sum d_i$)は721.18 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1338.78 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約5.46倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0145】

図55は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長797 nmから993 nmにわたって反射率は5.9%から8.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの反射率6.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率5.5%~8.0%の範囲の連続した波長帯域幅は196 nmである。この波長帯域幅を設定波長980 nmで割った値は約0.200であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0146】

実施の形態46.

本発明の実施の形態46に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図56を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態45に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1073$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を7.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.80763$ 、 $\phi_2 = 0.525803$ とすることによって波長1073 nmで反射率7.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 9.42 \text{ nm} / 132.09 \text{ nm} / 109.19 \text{ nm} / 157.57 \text{ nm} / 130.26 \text{ nm} / 137.45 \text{ nm} / 113.63 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}} = \sum d_i$)は789.61 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1465.82 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約5.98倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0147】

図56は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長872 nmから1088 nmにわたって反射率は5.9%から8.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1073 n

mの設定反射率7.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率5.5%~8.0%の範囲の連続した波長帯域幅は196nmである。この波長帯域幅を設定波長1073nmで割った値は約0.183であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0148】

実施の形態47.

本発明の実施の形態47に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図57を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を8.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.17$ 、 $A = 1.97$ 、 $B = 2.35$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.806965$ 、 $\phi_2 = 0.531203$ とすることによって波長980nmで反射率8.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 8.69\text{ nm} / 120.54\text{ nm} / 100.75\text{ nm} / 143.79\text{ nm} / 120.19\text{ nm} / 122.38\text{ nm} / 102.29\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は718.63nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1333.17nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.44倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0149】

図57は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の8%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長786nmから994nmにわたって反射率は7.0%から9.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率8.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率6.5%~9.0%の範囲の連続した波長帯域幅は208nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.212であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0150】

実施の形態48.

本発明の実施の形態48に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図58を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態47に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1079\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を8.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.806965$ 、 $\phi_2 = 0.531203$ とすることによって波長1079nmで反射率8.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 9.57\text{ nm} / 132.72\text{ nm} / 110.93\text{ nm} / 158.32\text{ nm} / 132.33\text{ nm} / 134.74\text{ nm} / 112.62\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は791.23nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1467.86nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.99倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0151】

図58は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の8%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長866nmから1094nmにわたって反射率は7.0%から9.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1079nmの設定反射率8.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率

6. 5%~9. 0%の範囲の連続した波長帯域幅は228 nmである。この波長帯域幅を設定波長1079 nmで割った値は約0. 211であり、仮想単層反射膜の場合の0. 065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたって平坦部を有していることがわかる。

【0152】

実施の形態49.

本発明の実施の形態49に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図59を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を9. 0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0. 20$ 、 $A = 2. 05$ 、 $B = 2. 40$ 、 $C = 1. 95$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0. 734549$ 、 $\phi_2 = 0. 580342$ とすることによって波長980 nmで反射率9. 0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 11. 17$ nm / $114. 18$ nm / $114. 54$ nm / $133. 67$ nm / $134. 10$ nm / $108. 61$ nm / $108. 96$ nmである。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は725. 23 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1330. 65 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約5. 43倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0153】

図59は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の9%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長793 nmから994 nmにわたって反射率は8. 1%から10. 0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの反射率8. 0%を基準として、-1. 5%から+1. 0%の範囲、即ち、反射率7. 5%~10. 0%の範囲の連続した波長帯域幅は202 nmである。この波長帯域幅を設定波長980 nmで割った値は約0. 206であり、仮想単層反射膜の場合の0. 065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0154】

実施の形態50.

本発明の実施の形態50に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図60を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態49に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1075$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を9. 0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0. 734549$ 、 $\phi_2 = 0. 580342$ とすることによって波長1075 nmで反射率9. 0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 12. 26$ nm / $125. 25$ nm / $125. 65$ nm / $146. 63$ nm / $147. 10$ nm / $119. 14$ nm / $119. 52$ nmである。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は795. 55 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1459. 67 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約5. 96倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0155】

図60は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の9%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長870 nmから1090 nmにわたって反射率は8. 1%から10. 0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1075 nmの設定反射率9. 0%を基準として、-1. 5%から+1. 0%の範囲、即ち、反射率7. 5%~10. 0%の範囲の連続した波長帯域幅は220 nmである。この波長帯域

幅を設定波長 1075 nm で割った値は約 0.205 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、反射率が高い波長帯域にわたって平坦部を有していることがわかる。

【0156】

実施の形態 51.

本発明の実施の形態 51 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 61 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 1 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 10.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.17$ 、 $A = 2.10$ 、 $B = 2.45$ 、 $C = 1.95$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.729549$ 、 $\phi_2 = 0.564265$ とすることによって波長 980 nm で反射率 10.0% とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 9.24 \text{ nm} / 116.17 \text{ nm} / 114.09 \text{ nm} / 135.53 \text{ nm} / 133.10 \text{ nm} / 107.87 \text{ nm} / 105.94 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 721.94 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1326.67 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 5.41 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0157】

図 61 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 10% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 773 nm から 994 nm にわたって反射率は 9.0% から 11.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 10.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 8.5% ~ 11.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 221 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.226 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、反射率が高い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0158】

実施の形態 52.

本発明の実施の形態 52 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 62 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 51 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1087 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 10.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.729549$ 、 $\phi_2 = 0.564265$ とすることによって波長 1087 nm で反射率 10.0% とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 10.24 \text{ nm} / 128.85 \text{ nm} / 126.54 \text{ nm} / 150.33 \text{ nm} / 147.63 \text{ nm} / 119.65 \text{ nm} / 117.50 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 800.74 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1471.49 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 6.01 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0159】

図 62 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 10% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 857 nm から 1102 nm にわたって反射率は 9.0% から 11.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1087 nm の設定反射率 10.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 8.5% ~ 11.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 245 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1087 nm で割った値は約 0.225 であり、仮想単層反射膜の場合

の 0.065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0160】

実施の形態 53.

本発明の実施の形態 53 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 63 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 1 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 11.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.20$ 、 $A = 2.20$ 、 $B = 2.55$ 、 $C = 1.95$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.674425$ 、 $\phi_2 = 0.572301$ とすることによって波長 980 nm で反射率 11.0% とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 11.02 \text{ nm} / 112.50 \text{ nm} / 121.22 \text{ nm} / 130.40 \text{ nm} / 140.51 \text{ nm} / 99.72 \text{ nm} / 107.45 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 722.82 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1320.69 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 5.39 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0161】

図 63 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 11% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 764 nm から 994 nm にわたって反射率は 10.2% から 12.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 11.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 9.5% ~ 12.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 230 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.235 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0162】

実施の形態 54.

本発明の実施の形態 54 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 64 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 53 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1092 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 11.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.674425$ 、 $\phi_2 = 0.572301$ とすることによって波長 1092 nm で反射率 11.0% とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 12.28 \text{ nm} / 125.36 \text{ nm} / 135.08 \text{ nm} / 145.31 \text{ nm} / 156.56 \text{ nm} / 111.12 \text{ nm} / 119.73 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 805.44 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1471.66 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 6.01 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0163】

図 64 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 11% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 851 nm から 1108 nm にわたって反射率は 10.2% から 12.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1092 nm の設定反射率 11.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 9.5% ~ 12.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 257 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1092 nm で割った値は約 0.235 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる

平坦部を有していることがわかる。

【0164】

実施の形態 55.

本発明の実施の形態 55 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 65 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 1 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 12.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.20$ 、 $A = 2.35$ 、 $B = 2.65$ 、 $C = 1.95$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.614143$ 、 $\phi_2 = 0.581984$ とすることによって波長 980 nm で反射率 12.0% とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 11.21 \text{ nm} / 109.43 \text{ nm} / 131.68 \text{ nm} / 123.40 \text{ nm} / 148.49 \text{ nm} / 90.81 \text{ nm} / 109.26 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 724.28 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1314.76 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 5.37 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0165】

図 65 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 12% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 751 nm から 995 nm にわたって反射率は 10.9% から 13.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 12.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 10.5% ~ 13.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 244 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.249 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0166】

実施の形態 56.

本発明の実施の形態 56 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 66 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 47 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1100 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 12.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.614143$ 、 $\phi_2 = 0.581984$ とすることによって波長 1100 nm で反射率 12.0% とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 12.58 \text{ nm} / 122.83 \text{ nm} / 147.80 \text{ nm} / 138.51 \text{ nm} / 166.67 \text{ nm} / 101.93 \text{ nm} / 122.64 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 812.96 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1475.74 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 6.02 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0167】

図 66 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 12% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 842 nm から 1117 nm にわたって反射率は 10.9% から 13.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1100 nm の設定反射率 12.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 10.5% ~ 13.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 275 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1100 nm で割った値は約 0.250 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0168】

以下に、実施の形態 43 から実施の形態 56 に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表 6 に示した。表 6 には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 λ 及び設定反射率 $R(\lambda)$ 、極小反射率、 $\sum n_i d_i$ 及び所定波長 980 nm の 1/4 波長 (245 nm) との対比、 $R(\lambda)$ の -1.5 ~ +1.0 % の範囲となる波長帯域幅 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\lambda/\lambda$ について示した。

【0169】

【表 6】

表 6

実施の形態	多層反射膜の特性					
	多層反射膜の構成	設定波長 λ 設定反射率 $R(\lambda)$	極小反射率	$\sum n_i d_i$ 、 波長 980nm の 1/4 波長 (245nm) との 対比	$R(\lambda)$ の -1.5 ~ +1.0 % となる波長 帯域 $\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$
43	7 層膜	980nm 6 %	5.0%	1350.16nm 5.51 倍	181nm	181/980= 0.185
44	7 層膜	1063nm 6 %	5.0%	1457.82nm 5.95 倍	196nm	196/1063= 0.184
45	7 層膜	980nm 7 %	5.9%	1338.78nm 5.46 倍	196nm	196/980= 0.200
46	7 層膜	1073nm 7 %	5.9%	1465.82nm 5.98 倍	196nm	196/1073= 0.183
47	7 層膜	980nm 8 %	7.0%	1333.17nm 5.44 倍	208nm	208/980= 0.212
48	7 層膜	1079nm 8 %	7.0%	1467.86nm 5.99 倍	228nm	228/1079= 0.211
49	7 層膜	980nm 9 %	8.1%	1330.65nm 5.43 倍	202nm	202/980= 0.206
50	7 層膜	1075nm 9 %	8.1%	1459.67nm 5.96 倍	220nm	220/1075= 0.205
51	7 層膜	980nm 10 %	9.0%	1326.67nm 5.41 倍	221nm	221/980= 0.226
52	7 層膜	1087nm 10 %	9.0%	1471.49nm 6.01 倍	245nm	245/1087= 0.225
53	7 層膜	980nm 11 %	10.2%	1320.69nm 5.39 倍	230nm	230/980= 0.235
54	7 層膜	1092nm 11 %	10.2%	1471.66nm 6.01 倍	257nm	257/1092= 0.235
55	7 層膜	980nm 12 %	10.9%	1314.76nm 5.37 倍	244nm	244/980= 0.249
56	7 層膜	1100nm 12 %	10.9%	1475.74nm 6.02 倍	275nm	275/1100= 0.250

【0170】

実施の形態 57.

本発明の実施の形態 57 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 67 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 17 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 6.0 % としており、パラメータは $A = 1.50$ 、 $B = 1.92$ 、 $C = 2.2$ としている点で相違する。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.16473$ 、 $\phi_2 = 0.7$

15823とすることによって波長980nmで反射率6.0%とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 132.47 \text{ nm} / 103.38 \text{ nm} / 169.57 \text{ nm} / 132.32 \text{ nm} / 194.30 \text{ nm} / 151.62 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}} = \sum d_i$)は883.66nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1648.43nmであり、所定波長980nmの $1/4$ 波長(=245nm)の約6.73倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0171】

図67は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長966nmから1219nmにわたって反射率は5.0%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率6.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率4.5%~7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は253nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.258であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この6層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0172】

実施の形態58.

本発明の実施の形態58に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図68を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態57に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 879 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を6.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.16473$ 、 $\phi_2 = 0.715823$ とすることによって波長879nmで反射率6.0%とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 118.82 \text{ nm} / 92.72 \text{ nm} / 152.09 \text{ nm} / 118.69 \text{ nm} / 174.27 \text{ nm} / 136.00 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}} = \sum d_i$)は792.59nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1478.54nmであり、所定波長980nmの $1/4$ 波長(=245nm)の約6.03倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0173】

図68は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長866nmから1093nmにわたって反射率は5.0%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長879nmの設定反射率6.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率4.5%~7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は227nmである。この波長帯域幅を設定波長879nmで割った値は約0.258であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この6層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0174】

実施の形態59.

本発明の実施の形態59に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図69を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態17に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を7.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.50$ 、 $B = 1.95$ 、 $C = 2.20$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.13181$ 、 $\phi_2 = 0.744018$ とすることによって波長980nmで反射率7.0%とすることがで

きる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 128.73 \text{ nm} / 107.45 \text{ nm} / 167.35 \text{ nm} / 139.69 \text{ nm} / 188.80 \text{ nm} / 157.59 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 889.61 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1653.06 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 6.75 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0175】

図69は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 964 nm から 1219 nm にわたって反射率は 6.4% から 8.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 7.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 $5.5\% \sim 8.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 255 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.260 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この6層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0176】

実施の形態60.

本発明の実施の形態60に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図70を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態59に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 880 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 7.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.13181$ 、 $\phi_2 = 0.744018$ とすることによって波長 880 nm で反射率 7.0% とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 115.59 \text{ nm} / 96.49 \text{ nm} / 150.27 \text{ nm} / 125.43 \text{ nm} / 169.54 \text{ nm} / 141.51 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 798.83 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1484.37 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 6.06 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0177】

図70は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 866 nm から 1094 nm にわたって反射率は 6.4% から 8.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 880 nm の設定反射率 7.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 $5.5\% \sim 8.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 228 nm である。この波長帯域幅を設定波長 880 nm で割った値は約 0.259 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この6層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0178】

実施の形態61.

本発明の実施の形態61に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図71を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態17に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 8.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.52$ 、 $B = 1.95$ 、 $C = 2.20$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.09941$ 、 $\phi_2 = 0.769346$ とすることによって波長 980 nm で反射率 8.0% とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 =$

$d_1 / C d_2 = 126.71 \text{ nm} / 112.59 \text{ nm} / 162.56 \text{ nm} / 144.44 \text{ nm} / 183.40 \text{ nm} / 162.96 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 892.66 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1652.67 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 6.75 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0179】

図 71 は、この 6 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、設定反射率の 8% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 964 nm から 1223 nm にわたって反射率は 7.4% から 9.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 8.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 $6.5\% \sim 9.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 259 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.264 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 6 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0180】

実施の形態 62.

本発明の実施の形態 62 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 72 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 61 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 878 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 8.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.09941$ 、 $\phi_2 = 0.769346$ とすることによって波長 878 nm で反射率 8.0% とすることができる。この場合、6 層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 113.52 \text{ nm} / 100.87 \text{ nm} / 145.64 \text{ nm} / 129.41 \text{ nm} / 164.31 \text{ nm} / 146.00 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 799.75 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1480.65 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 6.04 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0181】

図 72 は、この 6 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、設定反射率の 8% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 864 nm から 1096 nm にわたって反射率は 7.4% から 9.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 878 nm の設定反射率 8.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 $6.5\% \sim 9.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 232 nm である。この波長帯域幅を設定波長 878 nm で割った値は約 0.264 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 6 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0182】

実施の形態 63.

本発明の実施の形態 63 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 73 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 17 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 9.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.55$ 、 $B = 1.97$ 、 $C = 2.25$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.0677$ 、 $\phi_2 = 0.772496$ とすることによって波長 980 nm で反射率 8.0% とすることができる。この場合、6 層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 125.49 \text{ nm} / 115.28 \text{ nm} / 159.49 \text{ nm} / 146.52 \text{ nm}$

／182.16 nm／167.34 nmである。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 896.28 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1656.11 nmであり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245$ nm) の約 6.76 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0183】

図73は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の9%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 963 nm から 1235 nm にわたって反射率は 8.4% から 10.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 9.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 7.5% ～ 10.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 272 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.278 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この6層反射膜は、反射率の広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0184】

実施の形態 64.

本発明の実施の形態 64 に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図74を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 73 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 874$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 9.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.0677$ 、 $\phi_2 = 0.772496$ とすることによって波長 874 nm で反射率 9.0% とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 111.91$ nm / 102.81 nm / 142.24 nm / 130.67 nm / 162.45 nm / 149.24 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 799.32 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1476.95 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245$ nm) の約 6.03 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0185】

図74は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の9%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 859 nm から 1101 nm にわたって反射率は 8.4% から 10.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 874 nm の設定反射率 9.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 7.5% ～ 10.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 242 nm である。この波長帯域幅を設定波長 874 nm で割った値は約 0.244 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この6層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0186】

実施の形態 65.

本発明の実施の形態 65 に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図75を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 17 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 10.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.60$ 、 $B = 2.02$ 、 $C = 2.25$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.00317$ 、 $\phi_2 = 0.803388$ とすることによって波長 980 nm で反射率 10.0% とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 121.70$ nm / 123.76 nm / 153.64 nm / 156.25 nm / 171.14 nm / 174.04 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$)

i) は900.53 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1653.97 nmであり、所定波長980 nmの $1/4$ 波長(=245 nm)の約6.75倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0187】

図75は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の10%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長963 nmから1233 nmにわたって反射率は9.5%から11.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの反射率8.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率8.5%~11.0%の範囲の連続した波長帯域幅は270 nmである。この波長帯域幅を設定波長980 nmで割った値は約0.276であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この6層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0188】

実施の形態66.

本発明の実施の形態66に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図76を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態65に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 874$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を10.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.0031$ 、 $\phi_2 = 0.803388$ とすることによって波長874 nmで反射率10.0%とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 108.53 \text{ nm} / 110.37 \text{ nm} / 137.02 \text{ nm} / 139.35 \text{ nm} / 152.63 \text{ nm} / 155.21 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}} = \sum d_i$)は803.11 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1475.04 nmであり、所定波長980 nmの $1/4$ 波長(=245 nm)の約6.02倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0189】

図76は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の10%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長859 nmから1100 nmにわたって反射率は9.5%から11.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長874 nmの設定反射率10.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率8.5%~11.0%の範囲の連続した波長帯域幅は241 nmである。この波長帯域幅を設定波長874 nmで割った値は約0.276であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この6層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0190】

実施の形態67.

本発明の実施の形態67に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図77を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態17に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を11.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.65$ 、 $B = 2.05$ 、 $C = 2.20$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.931121$ 、 $\phi_2 = 0.862397$ とすることによって波長980 nmで反射率11.0%とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 116.49 \text{ nm} / 137.00 \text{ nm} / 144.73 \text{ nm} / 170.21 \text{ nm} / 155.33 \text{ nm} / 182.67 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}} = \sum d_i$)は906.43 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$

の総和 $\sum n_i d_i$ は、1650.45 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約6.74倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0191】

図77は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の11%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長963 nmから1233 nmにわたって反射率は10.4%から12.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの反射率11.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率9.5%~12.0%の範囲の連続した波長帯域幅は270 nmである。この波長帯域幅を設定波長980 nmで割った値は約0.276であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この6層反射膜は、反射率の広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0192】

実施の形態68.

本発明の実施の形態68に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図78を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態67に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 875$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を11.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.931121$ 、 $\phi_2 = 0.862397$ とすることによって波長875 nmで反射率11.0%とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 104.01$ nm/122.32 nm/129.23 nm/151.98 nm/138.68 nm/163.10 nmである。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は809.32 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1473.63 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約6.01倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0193】

図78は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の11%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長859 nmから1100 nmにわたって反射率は10.4%から12.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長875 nmの設定反射率11.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率9.5%~12.0%の範囲の連続した波長帯域幅は241 nmである。この波長帯域幅を設定波長875 nmで割った値は約0.275であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この6層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0194】

実施の形態69.

本発明の実施の形態69に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図79を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態17に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を12.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.70$ 、 $B = 2.07$ 、 $C = 2.15$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.853386$ 、 $\phi_2 = 0.935812$ とすることによって波長980 nmで反射率12.0%とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 110.00$ nm/153.17 nm/133.95 nm/186.51 nm/139.12 nm/193.71 nmである。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は916.46 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1652.07 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=

245 nm) の約 6.74 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0195】

図 79 は、この 6 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、設定反射率の 12% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 961 nm から 1240 nm にわたって反射率は 11.5% から 13.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 12.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 10.5% ~ 13.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 279 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.285 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 6 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0196】

実施の形態 70.

本発明の実施の形態 70 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 80 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 69 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 873$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 12.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.853386$ 、 $\phi_2 = 0.935812$ とすることによって波長 873 nm で反射率 12.0% とすることができる。この場合、6 層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 97.99 \text{ nm} / 136.45 \text{ nm} / 119.32 \text{ nm} / 166.14 \text{ nm} / 123.93 \text{ nm} / 172.56 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 816.56 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1471.67 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 6.01 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0197】

図 80 は、この 6 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、設定反射率の 12% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 856 nm から 1103 nm にわたって反射率は 11.5% から 13.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 873 nm の設定反射率 12.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 10.5% ~ 13.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 247 nm である。この波長帯域幅を設定波長 873 nm で割った値は約 0.283 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 6 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0198】

以下に、実施の形態 57 から実施の形態 70 に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表 7 に示した。表 7 には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 λ 及び設定反射率 $R(\lambda)$ 、極小反射率、 $\sum n_i d_i$ 及び所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (245 nm) との対比、 $R(\lambda)$ の -1.5 ~ +1.0% の範囲となる波長帯域幅 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\lambda/\lambda$ について示した。

【0199】

【表 7】

表 7

実施 の 形態	多層反射膜の特性					
	多層反射 膜の構成	設定波長 λ 設定反射率 $R(\lambda)$	極小反 射率	$\Sigma n_i d_i$ 、 波長 980nm の 1/4 波 長 (245nm) と の 対比	$R(\lambda)$ の -1.5~1.0% となる波長 帯域 $\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$
57	6 層膜	980nm 6 %	5.0%	1648.43nm 6.73 倍	253nm	253/980= 0.258
58	6 層膜	879nm 6 %	5.0%	1478.54nm 6.03 倍	227nm	227/879= 0.258
59	6 層膜	980nm 7 %	6.4%	1653.06nm 6.75 倍	255nm	255/980= 0.260
60	6 層膜	880nm 7 %	6.4%	1484.37nm 6.06 倍	228nm	228/880= 0.259
61	6 層膜	980nm 8 %	7.4%	1652.67nm 6.75 倍	259nm	259/980= 0.264
62	6 層膜	878nm 8 %	7.4%	1480.65nm 6.04 倍	232nm	232/878= 0.264
63	6 層膜	980nm 9 %	8.4%	1656.11nm 6.76 倍	272nm	272/980= 0.278
64	6 層膜	874nm 9 %	8.4%	1476.95nm 6.03 倍	242nm	242/874= 0.244
65	6 層膜	980nm 10 %	9.5%	1653.97nm 6.75 倍	270nm	270/980= 0.276
66	6 層膜	874nm 10 %	9.5%	1475.04nm 6.02 倍	241nm	241/874= 0.276
67	6 層膜	980nm 11 %	10.4%	1650.45nm 6.74 倍	270nm	270/980= 0.276
68	6 層膜	875nm 11 %	10.4%	1473.63nm 6.01 倍	241nm	241/875= 0.275
69	6 層膜	980nm 12 %	11.5%	1652.07nm 6.74 倍	279nm	279/980= 0.285
70	6 層膜	873nm 12 %	11.5%	1471.67nm 6.01 倍	247nm	247/873= 0.283

【0200】

実施の形態 71.

本発明の実施の形態 71 に係る 3 種類の膜を含む 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 81 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 25 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 6.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.05$ 、 $B = 2.00$ 、 $C = 2.00$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.09082$ 、 $\phi_2 = 0.85958$ とすることによって波長 980 nm で反射率 6.0% とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 50 \text{ nm} / 86.85 \text{ nm} / 86.90 \text{ nm} / 165.42 \text{ nm} / 165.52 \text{ nm} / 165.42 \text{ nm} / 165.52 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \Sigma d_i$) は 885.63 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\Sigma n_i d_i$ は、1639.85 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 6.69 倍と非常に厚い。このため、端面におけ

る放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0201】

図81は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長965nmから1186nmにわたって反射率は5.4%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率6.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率4.5%~7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は221nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.226であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0202】

実施の形態72.

本発明の実施の形態72に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図82を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態71に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 889\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を6.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.05881$ 、 $\phi_2 = 0.866436$ とすることによって波長889nmで反射率6.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50\text{ nm}/76.47\text{ nm}/79.46\text{ nm}/145.66\text{ nm}/151.35\text{ nm}/145.66\text{ nm}/151.35\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}} = \sum d_i$)は799.95nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1479.24nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.04倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0203】

図82は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長877nmから1081nmにわたって反射率は5.2%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長889nmの設定反射率6.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率4.5%~7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は204nmである。この波長帯域幅を設定波長889nmで割った値は約0.229であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0204】

実施の形態73.

本発明の実施の形態73に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図83を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を7.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.10$ 、 $B = 2.05$ 、 $C = 2.00$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.01208$ 、 $\phi_2 = 0.896867$ とすることによって波長980nmで反射率7.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50\text{ nm}/84.41\text{ nm}/94.98\text{ nm}/157.32\text{ nm}/177.02\text{ nm}/143.48\text{ nm}/172.70\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}} = \sum d_i$)は879.91nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1636.96nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.68倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0205】

図83は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長965nmから1194nmにわたって反射率は6.4%から8.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率7.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率5.5%~8.0%の範囲の連続した波長帯域幅は229nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.234であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0206】

実施の形態74.

本発明の実施の形態74に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図84を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態73に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 886\text{nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を7.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.97974$ 、 $\phi_2 = 0.904319$ とすることによって波長886nmで反射率7.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 50\text{nm} / 73.88\text{nm} / 86.59\text{nm} / 137.68\text{nm} / 161.37\text{nm} / 134.33\text{nm} / 157.43\text{nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}} = \sum d_i$)は801.28nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1471.83nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.01倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0207】

図84は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長874nmから1085nmにわたって反射率は6.0%から8.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長886nmの設定反射率7.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率5.5%~8.0%の範囲の連続した波長帯域幅は211nmである。この波長帯域幅を設定波長886nmで割った値は約0.238であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0208】

実施の形態75.

本発明の実施の形態75に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図85を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980\text{nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を8.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.10$ 、 $B = 2.05$ 、 $C = 2.00$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.991775$ 、 $\phi_2 = 0.923736$ とすることによって波長980nmで反射率8.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 50\text{nm} / 82.72\text{nm} / 97.83\text{nm} / 154.16\text{nm} / 182.32\text{nm} / 150.40\text{nm} / 177.87\text{nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}} = \sum d_i$)は895.3nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1642.23nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.70倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0209】

図 85 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 8 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 964 nm から 1204 nm にわたって反射率は 7.5 % から 9.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 8.0 % を基準として、-1.5 % から +1.0 % の範囲、即ち、反射率 6.5 % ~ 9.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 240 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.245 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0210】

実施の形態 76.

本発明の実施の形態 76 に係る 3 種類の膜を含む 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 86 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 75 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 881 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 8.0 % としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.958992$ 、 $\phi_2 = 0.930306$ とすることによって波長 881 nm で反射率 8.0 % とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 50 \text{ nm} / 71.91 \text{ nm} / 88.57 \text{ nm} / 134.01 \text{ nm} / 165.07 \text{ nm} / 130.74 \text{ nm} / 161.04 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 801.34 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1467.89 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 5.99 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0211】

図 86 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 8 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 869 nm から 1090 nm にわたって反射率は 7.1 % から 9.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 881 nm の設定反射率 8.0 % を基準として、-1.5 % から +1.0 % の範囲、即ち、反射率 6.5 % ~ 9.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 221 nm である。この波長帯域幅を設定波長 881 nm で割った値は約 0.251 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0212】

実施の形態 77.

本発明の実施の形態 77 に係る 3 種類の膜を含む 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 87 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 1 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 9.0 % としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.15$ 、 $B = 2.10$ 、 $C = 2.05$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.934834$ 、 $\phi_2 = 0.927699$ とすることによって波長 980 nm で反射率 9.0 % とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 50 \text{ nm} / 81.52 \text{ nm} / 102.72 \text{ nm} / 148.86 \text{ nm} / 187.57 \text{ nm} / 145.31 \text{ nm} / 183.10 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 899.08 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1643.29 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 6.71 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0213】

図 87 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は

波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 9 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 965 nm から 1220 nm にわたって反射率は 8.4 % から 10.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 9.0 % を基準として、-1.5 % から +1.0 % の範囲、即ち、反射率 7.5 % ~ 10.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 255 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.260 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0214】

実施の形態 78.

本発明の実施の形態 78 に係る 3 種類の膜を含む 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 88 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 77 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 874$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 9.0 % としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.900337$ 、 $\phi_2 = 0.935222$ とすることによって波長 874 nm で反射率 9.0 % とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 50$ nm / 70.02 nm / 92.35 nm / 127.86 nm / 168.64 nm / 124.81 nm / 164.62 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 798.3 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1456.86 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245$ nm) の約 5.95 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0215】

図 88 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 9 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 863 nm から 1096 nm にわたって反射率は 7.9 % から 10.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 874 nm の設定反射率 9.0 % を基準として、-1.5 % から +1.0 % の範囲、即ち、反射率 7.5 % ~ 10.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 233 nm である。この波長帯域幅を設定波長 874 nm で割った値は約 0.267 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0216】

実施の形態 79.

本発明の実施の形態 79 に係る 3 種類の膜を含む 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 89 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 25 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 10.0 % としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.15$ 、 $B = 2.10$ 、 $C = 2.05$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.914148$ 、 $\phi_2 = 0.95535$ とすることによって波長 980 nm で反射率 10.0 % とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 50$ nm / 79.71 nm / 105.78 nm / 145.56 nm / 193.16 nm / 142.10 nm / 188.56 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 904.87 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1649.03 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245$ nm) の約 6.73 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0217】

図 89 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 10 % 前後の平坦部

分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 963 nm から 1235 nm にわたって反射率は 9.6% から 11.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 10.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 8.5% ~ 11.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 272 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.278 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0218】

実施の形態 80.

本発明の実施の形態 80 に係る 3 種類の膜を含む 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 90 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 79 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 868$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 10.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.879123$ 、 $\phi_2 = 0.96166$ とすることによって波長 868 nm で反射率 10.0% とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 50$ nm / 67.90 nm / 94.31 nm / 123.99 nm / 172.21 nm / 121.03 nm / 168.11 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 797.55 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1451.38 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245$ nm) の約 5.92 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0219】

図 90 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 8% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 856 nm から 1102 nm にわたって反射率は 8.7% から 11.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 868 nm の設定反射率 10.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 8.5% ~ 11.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 246 nm である。この波長帯域幅を設定波長 868 nm で割った値は約 0.283 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0220】

実施の形態 81.

本発明の実施の形態 81 に係る 3 種類の膜を含む 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 91 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 25 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 11.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.17$ 、 $B = 2.10$ 、 $C = 2.05$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.881444$ 、 $\phi_2 = 0.983957$ とすることによって波長 980 nm で反射率 11.0% とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 50$ nm / 78.20 nm / 110.84 nm / 140.35 nm / 198.94 nm / 137.01 nm / 194.21 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 909.55 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1651.45 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245$ nm) の約 6.74 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0221】

図 91 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 11% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 963 nm から 1254 nm にわ

たつて反射率は10.4%から12.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率11.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率9.5%~12.0%の範囲の連続した波長帯域幅は291nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.297であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が高い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0222】

実施の形態82.

本発明の実施の形態82に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図92を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態91に係る半導体光素子と比較すると、パラメータ $A=1.15$ 、 $B=2.10$ 、 $C=2.05$ とし、設定波長 $\lambda=862\text{nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を11.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1=0.856738$ 、 $\phi_2=0.989623$ とすることによって波長862nmで反射率11.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2=50\text{nm}/65.71\text{nm}/96.38\text{nm}/119.99\text{nm}/176.00\text{nm}/117.14\text{nm}/171.81\text{nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}}=\sum d_i$)は797.03nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1446.13nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.90倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0223】

図92は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の11%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長850nmから1110nmにわたって反射率は9.5から12.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長862nmの設定反射率11.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率9.5%~12.0%の範囲の連続した波長帯域幅は260nmである。この波長帯域幅を設定波長862nmで割った値は約0.302であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0224】

実施の形態83.

本発明の実施の形態83に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図93を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda=980\text{nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を12.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A=1.22$ 、 $B=2.13$ 、 $C=2.05$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1=0.815005$ 、 $\phi_2=1.02518$ とすることによって波長980nmで反射率12.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2=50\text{nm}/75.39\text{nm}/120.42\text{nm}/131.63\text{nm}/210.24\text{nm}/126.69\text{nm}/202.34\text{nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}}=\sum d_i$)は916.71nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1653.50nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.75倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0225】

図93は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の12%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長962nmから1275nmにわ

たつて反射率は10.7%から13.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率12.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率10.5%~13.0%の範囲の連続した波長帯域幅は313nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.319であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が高い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0226】

実施の形態84.

本発明の実施の形態84に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図94を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態83に係る半導体光素子と比較すると、パラメータは $A=1.13$ 、 $B=2.10$ 、 $C=2.05$ とし、設定波長 $\lambda=853\text{nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を12.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1=0.842465$ 、 $\phi_2=1.02038$ とすることによって波長853nmで反射率12.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2=50\text{nm}/62.83\text{nm}/96.63\text{nm}/116.76\text{nm}/179.57\text{nm}/113.98\text{nm}/175.30\text{nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}}=\sum d_i$)は795.07nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1438.90nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.87倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0227】

図94は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の12%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長838nmから1116nmにわたって反射率は10.6%から13.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長853nmの設定反射率12.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率10.5%~13.0%の範囲の連続した波長帯域幅は278nmである。この波長帯域幅を設定波長853nmで割った値は約0.326であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0228】

以下に、実施の形態71から実施の形態84に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表8に示した。表8には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 λ 及び設定反射率 $R(\lambda)$ 、極小反射率、 $\sum n_i d_i$ 及び所定波長980nmの1/4波長(245nm)との対比、 $R(\lambda)$ の-1.5~+1.0%の範囲となる波長帯域幅 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\lambda/\lambda$ について示した。

【0229】

【表 8】

表 8

実施 の 形態	多層反射膜の特性					
	多層反射 膜の構成	設定波長 λ 設定反射率 $R(\lambda)$	極小反 射率	$\Sigma n_i d_i$ 、 波長 980nm の 1/4 波 長 (245nm) と の 対比	$R(\lambda)$ の -1.5~1.0% となる波長 帯域 $\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$
71	7 層膜 (3 種類)	980nm 6 %	5.4%	1639.85nm 6.69 倍	221nm	221/980= 0.226
72	7 層膜 (3 種類)	889nm 6 %	5.2%	1479.24nm 6.04 倍	204nm	204/889= 0.229
73	7 層膜 (3 種類)	980nm 7 %	6.4%	1636.96nm 6.68 倍	229nm	229/980= 0.234
74	7 層膜 (3 種類)	886nm 7 %	6.0%	1471.83nm 6.01 倍	211nm	211/886= 0.238
75	7 層膜 (3 種類)	980nm 8 %	7.5%	1642.23nm 6.70 倍	240nm	240/980= 0.245
76	7 層膜 (3 種類)	881nm 8 %	7.1%	1467.89nm 5.99 倍	221nm	221/881= 0.251
77	7 層膜 (3 種類)	980nm 9 %	8.4%	1643.29nm 6.71 倍	255nm	255/980= 0.260
78	7 層膜 (3 種類)	874nm 9 %	7.9%	1456.86nm 5.95 倍	233nm	233/874= 0.267
79	7 層膜 (3 種類)	980nm 10 %	9.6%	1649.03nm 6.73 倍	272nm	272/980= 0.278
80	7 層膜 (3 種類)	868nm 10 %	8.7%	1451.38nm 5.92 倍	246nm	246/868= 0.283
81	7 層膜 (3 種類)	980nm 11 %	10.4%	1651.45nm 6.74 倍	291nm	291/980= 0.297
82	7 層膜 (3 種類)	862nm 11 %	9.5%	1446.13nm 5.90 倍	260nm	260/862= 0.320
83	7 層膜 (3 種類)	980nm 12 %	10.7%	1653.50nm 6.75 倍	313nm	313/980= 0.319
84	7 層膜 (3 種類)	853nm 12 %	10.6%	1438.90nm 5.87 倍	278nm	278/853= 0.326

【0230】

実施の形態 85.

本発明の実施の形態 85 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 95 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 33 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 6.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.10$ 、 $A = 2.7$ 、 $B = 2.1$ 、 $C = 2.0$ 、 $D = 2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.429458$ 、 $\phi_2 = 0.889116$ とすることによって波長 980 nm で反射率 6.0%とすることができる。この場合、9 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 8.56 \text{ nm} / 87.92 \text{ nm} / 231.13 \text{ nm} / 68.38 \text{ nm} / 179.77 \text{ nm} / 65.13 \text{ nm} / 171.21 \text{ nm} / 65.13 \text{ nm} / 171.21 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \Sigma d_i$) は 1048.44 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 n_i

d_i の総和 $\sum n_i d_i$ は、1823.70 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 7.44 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0231】

図 95 は、この 9 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、設定反射率の 6% 前後の平坦部分幅広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 893 nm から 993 nm にわたって反射率は 5.1% から 7.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 6.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 4.5% ~ 7.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 100 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.102 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 9 層反射膜は、反射率幅広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0232】

実施の形態 86.

本発明の実施の形態 86 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 96 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 85 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1018$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 6.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.429458$ 、 $\phi_2 = 0.889116$ とすることによって波長 1018 nm で反射率 6.0% とすることができる。この場合、9 層反射膜のそれぞれの膜厚は $Od_2 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / Dd_1 / Dd_2 = 8.89$ nm / 91.33 nm / 240.09 nm / 71.04 nm / 186.74 nm / 67.65 nm / 177.85 nm / 67.65 nm / 177.85 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1089.09 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1857.42 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 7.73 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0233】

図 96 は、この 9 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、設定反射率の 6% 前後の平坦部分幅広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 928 nm から 1031 nm にわたって反射率は 5.1% から 7.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1018 nm の設定反射率 6.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 4.5% ~ 7.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 103 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1018 nm で割った値は約 0.101 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 9 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0234】

実施の形態 87.

本発明の実施の形態 87 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 97 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 33 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 7.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.10$ 、 $A = 2.7$ 、 $B = 2.15$ 、 $C = 1.9$ 、 $D = 1.9$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.413831$ 、 $\phi_2 = 0.91752$ とすることによって波長 980 nm で反射率 7.0% とすることができる。この場合、9 層反射膜のそれぞれの膜厚は $Od_2 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / Dd_1 / Dd_2 = 8.83$ nm / 84.72 nm / 238.51 nm / 65.90 nm / 185.51 nm / 59.62 nm / 167.84 nm / 59.62 nm / 167.84 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} =$

$\sum d_i$) は 1038.39 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1800.12 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 7.35 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0235】

図 97 は、この 9 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、設定反射率の 7% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 898 nm から 993 nm にわたって反射率は 6.3% から 8.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 7.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 5.5% ~ 8.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 95 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.097 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 9 層反射膜は、反射率の広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0236】

実施の形態 88.

本発明の実施の形態 88 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 98 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 87 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1016$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 7.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.413831$ 、 $\phi_2 = 0.91752$ とすることによって波長 1016 nm で反射率 7.0% とすることができる。この場合、9 層反射膜のそれぞれの膜厚は $Od_2 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / Dd_1 / Dd_2 = 9.16$ nm / 87.83 nm / 247.27 nm / 68.32 nm / 192.32 nm / 61.81 nm / 174.01 nm / 61.81 nm / 174.01 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1076.54 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1866.25 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 7.62 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0237】

図 98 は、この 9 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、設定反射率の 7% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 931 nm から 1029 nm にわたって反射率は 6.3% から 8.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1016 nm の設定反射率 7.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 5.5% ~ 8.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 98 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1016 nm で割った値は約 0.096 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 9 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0238】

実施の形態 89.

本発明の実施の形態 89 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 99 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 33 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 8.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.10$ 、 $A = 2.70$ 、 $B = 2.10$ 、 $C = 2.05$ 、 $D = 1.80$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.395103$ 、 $\phi_2 = 0.933593$ とすることによって波長 980 nm で反射率 8.0% とすることができる。この場合、9 層反射膜のそれぞれの膜厚は $Od_2 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / Dd_1 / Dd_2 = 8.99$ nm / 80.89 nm / 242.69 nm / 62.91 nm / 188.76 nm / 61.42 nm

m/184.27 nm/53.93 nm/161.79 nmである。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は1045.65 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1807.20 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長 (=245 nm) の約7.38倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0239】

図99は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の8%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長886 nmから991 nmにわたって反射率は7.0%から9.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの反射率8.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率6.5%~9.0%の範囲の連続した波長帯域幅は105 nmである。この波長帯域幅を設定波長980 nmで割った値は約0.107であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この9層反射膜は、反射率の広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0240】

実施の形態90.

本発明の実施の形態90に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図100を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態89に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1023$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を8.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.395103$ 、 $\phi_2 = 0.933593$ とすることによって波長1023 nmで反射率8.0%とすることができる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は $Od_2 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / Dd_1 / Dd_2 = 9.38$ nm/84.44 nm/253.34 nm/65.67 nm/197.04 nm/64.11 nm/192.35 nm/56.29 nm/168.89 nmである。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は1091.51 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1886.46 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長 (=245 nm) の約7.70倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0241】

図100は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の8%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長925 nmから1034 nmにわたって反射率は7.0%から9.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1023 nmの設定反射率8.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率6.5%~9.0%の範囲の連続した波長帯域幅は109 nmである。この波長帯域幅を設定波長1023 nmで割った値は約0.107であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0242】

実施の形態91.

本発明の実施の形態91に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図101を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態33に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を9.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.10$ 、 $A = 2.70$ 、 $B = 2.10$ 、 $C = 2.15$ 、 $D = 1.75$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.392646$ 、 $\phi_2 = 0.930741$ とすることによって波長980 nmで反射率9.0%とすることができる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は $Od_2 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / Dd_1 / Dd_2 = 8.96$ nm

／80.39 nm／241.95 nm／62.52 nm／188.16 nm／64.01 nm／192.66 nm／52.10 nm／156.82 nmである。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は1047.59 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1810.29 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長 (=245 nm) の約7.39倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0243】

図101は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の9%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長872 nmから990 nmにわたって反射率は7.8%から10.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの反射率9.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率7.5%～10.0%の範囲の連続した波長帯域幅は118 nmである。この波長帯域幅を設定波長980 nmで割った値は約0.120であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この9層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0244】

実施の形態92.

本発明の実施の形態92に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図102を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態91に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1031$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を9.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.392646$ 、 $\phi_2 = 0.930741$ とすることによって波長1031 nmで反射率9.0%とすることができる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 9.43$ nm／84.57 nm／254.54 nm／65.78 nm／197.98 nm／67.34 nm／202.69 nm／54.81 nm／164.98 nmである。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は1102.12 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1904.52 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長 (=245 nm) の約7.77倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0245】

図102は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の9%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長918 nmから1041 nmにわたって反射率は7.8%から10.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1031 nmの設定反射率9.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率7.5%～10.0%の範囲の連続した波長帯域幅は123 nmである。この波長帯域幅を設定波長1031 nmで割った値は約0.119であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0246】

実施の形態93.

本発明の実施の形態93に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図103を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態33に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を10.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.10$ 、 $A = 2.75$ 、 $B = 2.10$ 、 $C = 2.25$ 、 $D = 1.75$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.394052$ 、 $\phi_2 = 0.907302$ とすることによって波長980 nmで反射率10.0%とすることができる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は

$O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 8.74 \text{ nm} / 82.17 \text{ nm} / 240.22 \text{ nm} / 62.75 \text{ nm} / 183.44 \text{ nm} / 67.33 \text{ nm} / 196.55 \text{ nm} / 52.29 \text{ nm} / 152.87 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1046.36 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1810.50 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 7.39 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0247】

図103は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の9%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 866 nm から 990 nm にわたって反射率は 8.7% から 11.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 10.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 $8.5\% \sim 11.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 124 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.127 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この9層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0248】

実施の形態94.

本発明の実施の形態94に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図104を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態93に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1035 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 10.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.394052$ 、 $\phi_2 = 0.907302$ とすることによって波長 1035 nm で反射率 10.0% とすることができる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 9.23 \text{ nm} / 86.78 \text{ nm} / 253.71 \text{ nm} / 66.27 \text{ nm} / 193.74 \text{ nm} / 71.00 \text{ nm} / 207.58 \text{ nm} / 55.22 \text{ nm} / 161.45 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1104.98 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1912.11 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 7.80 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0249】

図104は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の10%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 914 nm から 1045 nm にわたって反射率は 8.7% から 11.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1035 nm の設定反射率 10.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 $8.5\% \sim 11.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 131 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1035 nm で割った値は約 0.127 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0250】

実施の形態95.

本発明の実施の形態95に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図105を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 11.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.10$ 、 $A = 2.80$ 、 $B = 2.10$ 、 $C = 2.35$ 、 $D = 1.75$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.395641$ 、 $\phi_2 = 0.88414$ とすることによって波長 980 nm

で反射率 11.0%とすることができる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 8.51 \text{ nm} / 84.00 \text{ nm} / 238.35 \text{ nm} / 63.00 \text{ nm} / 178.76 \text{ nm} / 70.50 \text{ nm} / 200.04 \text{ nm} / 52.50 \text{ nm} / 148.97 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 1044.63 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1810.29 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 7.39 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0251】

図 105 は、この 9 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、設定反射率の 11% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 856 nm から 990 nm にわたって反射率は 9.7% から 12.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 11.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 9.5% ~ 12.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 134 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.137 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 9 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0252】

実施の形態 96.

本発明の実施の形態 96 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 106 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 95 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1040 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 11.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.395641$ 、 $\phi_2 = 0.88414$ とすることによって波長 1040 nm で反射率 11.0% とすることができる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 9.03 \text{ nm} / 89.14 \text{ nm} / 252.94 \text{ nm} / 66.86 \text{ nm} / 189.71 \text{ nm} / 74.81 \text{ nm} / 212.29 \text{ nm} / 55.71 \text{ nm} / 158.09 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = \sum d_i$) は 1108.58 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1921.11 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 7.84 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0253】

図 106 は、この 9 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、設定反射率の 11% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 909 nm から 1050 nm にわたって反射率は 9.7% から 12.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1040 nm の設定反射率 11.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 9.5% ~ 12.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 141 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1040 nm で割った値は約 0.136 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 9 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0254】

実施の形態 97.

本発明の実施の形態 97 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 107 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 1 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 12.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.10$ 、 $A = 2.85$ 、 $B = 2.10$ 、 $C = 2.42$ 、 $D = 1.75$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2

を、 $\phi_1 = 0.39697$ 、 $\phi_2 = 0.864124$ とすることによって波長 980 nm で反射率 12.0%とすることができる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は $Od_2 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / Dd_1 / Dd_2 = 8.32 \text{ nm} / 85.79 \text{ nm} / 237.11 \text{ nm} / 63.21 \text{ nm} / 174.71 \text{ nm} / 72.84 \text{ nm} / 201.34 \text{ nm} / 52.68 \text{ nm} / 145.60 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1041.60 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1807.36 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 7.38 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0255】

図 107 は、この 9 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、設定反射率の 12% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 852 nm から 990 nm にわたって反射率は 10.8% から 13.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 12.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 10.5% ~ 13.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 138 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.141 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 9 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0256】

実施の形態 98.

本発明の実施の形態 98 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 108 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 97 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1043 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 12.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.39697$ 、 $\phi_2 = 0.864124$ とすることによって波長 1043 nm で反射率 12.0%とすることができる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は $Od_2 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / Dd_1 / Dd_2 = 8.85 \text{ nm} / 91.30 \text{ nm} / 252.35 \text{ nm} / 67.27 \text{ nm} / 185.95 \text{ nm} / 77.53 \text{ nm} / 214.28 \text{ nm} / 56.06 \text{ nm} / 154.95 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1108.54 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1923.51 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 7.85 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0257】

図 108 は、この 9 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、設定反射率の 12% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 907 nm から 1053 nm にわたって反射率は 10.8% から 13.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1043 nm の設定反射率 12.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 10.5% ~ 13.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 146 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1043 nm で割った値は約 0.140 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 9 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0258】

以下に、実施の形態 85 から実施の形態 98 に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表 9 に示した。表 9 には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 λ 及び設定反射率 $R(\lambda)$ 、極小反射率、 $\sum n_i d_i$ 及び所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (245 nm) との対比、 $R(\lambda)$ の -1.5 ~ +1.0% の範囲となる波長帯域幅 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\lambda/\lambda$ について示した。

【0259】

【表9】

表9

実施の形態	多層反射膜の特性					
	多層反射膜の構成	設定波長 λ 設定反射率 $R(\lambda)$	極小反射率	$\Sigma n_i d_i$ 、 波長980nmの 1/4波長 (245nm)との 対比	$R(\lambda)$ の -1.5~1.0% となる波長 帯域 $\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$
85	9層膜	980nm 6%	5.1%	1823.70nm 7.44倍	100nm	100/980= 0.102
86	9層膜	1018nm 6%	5.1%	1857.42nm 7.73倍	103nm	103/1018= 0.101
87	9層膜	980nm 7%	6.3%	1800.12nm 7.35倍	95nm	95/980= 0.097
88	9層膜	1016nm 7%	6.3%	1866.25nm 7.62倍	98nm	98/1016= 0.096
89	9層膜	980nm 8%	7.0%	1807.20nm 7.38倍	105nm	105/980= 0.107
90	9層膜	1023nm 8%	7.0%	1886.46nm 7.70倍	109nm	109/1023= 0.107
91	9層膜	980nm 9%	7.8%	1810.29nm 7.39倍	118nm	118/980= 0.120
92	9層膜	1031nm 9%	7.8%	1904.52nm 7.77倍	123nm	123/1031= 0.119
93	9層膜	980nm 10%	8.7%	1810.50nm 7.39倍	124nm	124/980= 0.127
94	9層膜	1035nm 10%	8.7%	1912.11nm 7.80倍	131nm	131/1035= 0.127
95	9層膜	980nm 11%	9.7%	181029nm 7.39倍	134nm	134/980= 0.137
96	9層膜	1040nm 11%	9.7%	1921.11nm 7.84倍	141nm	141/1040= 0.136
97	9層膜	980nm 12%	10.8%	1807.36nm 7.38倍	138nm	138/980= 0.141
98	9層膜	1043nm 12%	10.8%	1923.51nm 7.85倍	146nm	146/1043= 0.140

【0260】

実施の形態99.

本発明の実施の形態99に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について図109及び図110を用いて説明する。図109は、半導体光素子の端面部の反射膜として、単層反射膜に代えて3種類の膜からなる8層反射膜70を設けた場合の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、多層反射膜が3種類の膜からなる8層反射膜70で構成されている点で相違する。さらに詳細には、導波層10に接する第1層膜及び第2層膜がそれぞれアルミナ及び石英と、半導体レーザーの等価屈折率より小さい屈折率である点で相違する。なお、第3層膜から第8層膜にかけては酸化タンタル及び石英が交互に積層されている。

【0261】

この3種類の膜を含む8層反射膜70の反射率が所定波長で前記仮想単層膜の反射率と同一に設定する条件について検討する。ここでは、導波層10に接する第1層膜に第3の

種類の膜を用いた場合について検討する。この第3の膜の位相変化 ϕ_3 は、下記式(20)で表される。

【数21】

$$\phi_3 = \frac{2\pi}{\lambda} n_3 d_3 \quad (20)$$

【0262】

そこで、この3種類の膜からなる8層反射膜70の振幅反射率は、上記7層反射膜と同様に下記式(21)で表される。

【数22】

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12})n_c - (m_{21} + m_{22})}{(m_{11} + m_{12})n_c + (m_{21} + m_{22})} \quad (21)$$

【0263】

ここで、 m_{ij} (i, j は1又は2)は下記式(22)で表される。

【数23】

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi_3 & -\frac{i}{n_3} \sin \phi_3 \\ -in_3 \sin \phi_3 & \cos \phi_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -n_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -n_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos C\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin C\phi_1 \\ -in_1 \sin C\phi_1 & \cos C\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos C\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin C\phi_2 \\ -n_2 \sin C\phi_2 & \cos C\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos D\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin D\phi_1 \\ -in_1 \sin D\phi_1 & \cos D\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos D\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin D\phi_2 \\ -n_2 \sin D\phi_2 & \cos D\phi_2 \end{pmatrix} \quad (22)$$

【0264】

なお、A、B、C、Dは、第2層膜72の膜厚 Ad_2 、第3層膜73の膜厚 Bd_1 、第4層膜74の膜厚 Bd_2 、第5層膜75の膜厚 Cd_1 、第6層膜76の膜厚 Cd_2 、第7層膜77の膜厚 Dd_1 、第8層膜78の膜厚 Dd_2 とした場合の、それぞれの2層膜(ペア)の寄与率を表すパラメータである。ただし、Aは第2層膜の寄与率のみを表す。

【0265】

以下、半導体光素子の端面部に3種類の膜を含む8層反射膜70を設けた場合について説明する。図109は、端面部に設けた3種類の膜を含む8層反射膜70の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子では、導波層10(等価屈折率 $n_c = 3.37$)の端面部に順に、アルミナの第1層膜71(屈折率 $n_3 = 1.636$ 、膜厚 $d_3 = 10\text{nm}$)、石英の第2層膜72(屈折率 $n_2 = 1.457$ 、膜厚 Ad_2)、酸化タantalの第3層膜73(屈折率 $n_1 = 2.072$ 、膜厚 Bd_1)、石英の第4層膜74(屈折率 $n_2 = 1.457$ 、膜厚 Bd_2)、酸化タantalの第5層膜75(屈折率 $n_1 = 2.072$ 、膜厚 Cd_1)、石英の第6層膜76(屈折率 $n_2 = 1.457$ 、膜厚 Cd_2)、酸化タantalの第7層膜77(屈折率 $n_1 = 2.072$ 、膜厚 Dd_1)、石英の第8層膜78(屈折率 $n_2 = 1.457$ 、膜厚 Dd_2)が積層されている。さらに、この8層反射膜70は、空気等の自由空間5に接している。

【0266】

この半導体光素子の端面部の8層反射膜70の反射特性について説明する。まず、設定波長 $\lambda = 808\text{nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を4.0%とする。各パラメータを、 $A = 0$ 、

32、 $B=1.96$ 、 $C=1.85$ 、 $D=2.00$ とした場合、酸化タンタル及び石英の位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1=0.356684$ 、 $\phi_2=1.26875$ である場合に波長808nmで反射率4.0%が得られる。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2/D d_1/D d_2=10\text{nm}/35.83\text{nm}/43.39\text{nm}/219.49\text{nm}/40.95\text{nm}/207.17\text{nm}/44.27\text{nm}/223.96\text{nm}$ である。全体の膜厚($d_{total}=\sum d_i$)は825.06nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2108.54nmであり、所定波長808nmの1/4波長(=202nm)の約10.44倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0267】

図110は、この8層反射膜70の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の4.0%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長802nmから941nmにわたって反射率は2.6%から5.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長808nmの反射率4.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、2.5%~5.0%の範囲の連続した波長帯域幅は139nmである。この波長帯域幅を設定波長808nmで割った値は約0.172であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この8層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0268】

実施の形態100.

本発明の実施の形態100に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図111を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態99に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda=744\text{nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を4.0%としている点で相違する。また、パラメータは $B=1.95$ としている点で相違する。また、酸化タンタル及び石英のそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1=0.361744$ 、 $\phi_2=1.26093$ とすることによって波長744nmで反射率4.0%とすることができる。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2/D d_1/D d_2=10\text{nm}/32.79\text{nm}/40.31\text{nm}/199.83\text{nm}/38.25\text{nm}/189.58\text{nm}/41.35\text{nm}/204.95\text{nm}$ である。全体の膜厚($d_{total}=\sum d_i$)は757.06nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1949.67nmであり、所定波長808nmの1/4波長(=202nm)の約9.65倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0269】

図111は、この8層反射膜70の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の4.0%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長738nmから869nmにわたって反射率は2.5%から5.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長744nmの設定反射率4.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、2.5%~5.0%の範囲の連続した波長帯域幅は131nmである。この波長帯域幅を設定波長744nmで割った値は約0.176であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この8層反射膜70は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0270】

実施の形態101.

本発明の実施の形態101に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図112を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態99に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda=808\text{nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を8.0%としている点で相違する。

また、パラメータは $A=0.20$ 、 $B=2.00$ 、 $C=2.00$ 、 $D=2.00$ としている。さらに、酸化タンタル及び石英のそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1=0.374385$ 、 $\phi_2=1.26121$ とすることによって波長808nmで反射率8.0%とすることができる。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2/D d_1/D d_2=10\text{nm}/22.26\text{nm}/46.47\text{nm}/22.26\text{nm}/46.47\text{nm}/22.26\text{nm}/46.47\text{nm}/22.26\text{nm}$ である。全体の膜厚($d_{total}=\sum d_i$)は839.56nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2177.34nmであり、所定波長808nmの1/4波長(=202nm)の約10.78倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0271】

図112は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の8.0%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長801nmから946nmにわたって反射率は6.6%から9.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長808nmの反射率8.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、6.5%~9.0%の範囲の連続した波長帯域幅は145nmである。この波長帯域幅を設定波長808nmで割った値は約0.179であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が高い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0272】

実施の形態102.

本発明の実施の形態102に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図113を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態101に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda=753\text{nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を8.0%として、パラメータは $A=0.19$ としている点で相違する。また、酸化タンタル及び石英のそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1=0.370822$ 、 $\phi_2=1.26896$ とすることによって波長753nmで反射率8.0%とすることができる。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2/D d_1/D d_2=10\text{nm}/19.83\text{nm}/42.90\text{nm}/208.75\text{nm}/42.90\text{nm}/208.75\text{nm}/42.90\text{nm}/208.75\text{nm}$ である。全体の膜厚($d_{total}=\sum d_i$)は784.78nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2024.36nmであり、所定波長808nmの1/4波長(=202nm)の約10.02倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0273】

図113は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の8.0%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長746nmから870nmにわたって反射率は6.7%から9.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長753nmの設定反射率8.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、6.5%~9.0%の範囲の連続した波長帯域幅は124nmである。この波長帯域幅を設定波長753nmで割った値は約0.165であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が高い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0274】

実施の形態103.

本発明の実施の形態103に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図114を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態99に係る半導体光素子と比較する

と、設定波長 $\lambda = 808 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を12.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 0.14$ 、 $B = 1.95$ 、 $C = 1.80$ 、 $D = 2.00$ としている。さらに、酸化タンタル及び石英のそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.403695$ 、 $\phi_2 = 1.34024$ とすることによって波長808 nmで反射率12.0%とすることができる。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 10 \text{ nm} / 16.56 \text{ nm} / 48.86 \text{ nm} / 230.67 \text{ nm} / 45.10 \text{ nm} / 212.93 \text{ nm} / 50.11 \text{ nm} / 236.58 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}} = \sum d_i$)は850.81 nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2264.47 nmであり、所定波長808 nmの1/4波長(=202 nm)の約11.21倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0275】

図113は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の12.0%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長801 nmから1037 nmにわたって反射率は10.7%から13.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長808 nmの反射率12.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、10.5%~13.0%の範囲の連続した波長帯域幅は236 nmである。この波長帯域幅を設定波長808 nmで割った値は約0.292であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0276】

実施の形態104.

本発明の実施の形態104に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図115を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態103に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 706 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を12.0%として、パラメータは $B = 1.93$ としている点で相違する。また、酸化タンタル及び石英のそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.412469$ 、 $\phi_2 = 1.3303$ とすることによって波長706 nmで反射率12.0%とすることができる。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 10 \text{ nm} / 14.43 \text{ nm} / 43.49 \text{ nm} / 198.96 \text{ nm} / 40.56 \text{ nm} / 185.56 \text{ nm} / 45.06 \text{ nm} / 206.18 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}} = \sum d_i$)は744.24 nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2005.83 nmであり、所定波長808 nmの1/4波長(=202 nm)の約9.93倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0277】

図115は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の12.0%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長707 nmから908 nmにわたって反射率は10.9%から13.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長706 nmの設定反射率12.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、10.5%~13.0%の範囲の連続した波長帯域幅は201 nmである。この波長帯域幅を設定波長706 nmで割った値は約0.285であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0278】

実施の形態105.

本発明の実施の形態105に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図116

及び図117を用いて説明する。図116は、半導体光素子の端面部の反射膜として、単層反射膜に代えて3種類の膜からなる8層反射膜80を設けた場合の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子は、実施の形態99に係る半導体光素子と比較すると、導波層10に接する第1層膜及び第2層膜がそれぞれ石英及びアルミナであり、第3層膜から第8層膜にかけて酸化タンタルおよびアルミナが積層されている点で相違する。

【0279】

以下、半導体光素子の端面部に3種類の膜を含む8層反射膜80を設けた場合について説明する。図116は、端面部に設けた3種類の膜を含む8層反射膜の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子では、導波層10（等価屈折率 $n_c = 3.37$ ）の端面部に順に、石英の第1層膜81（屈折率 $n_3 = 1.457$ 、膜厚 $d_3 = 5\text{ nm}$ ）、アルミナの第2層膜82（屈折率 $n_2 = 1.636$ 、膜厚 $A d_2$ ）、酸化タンタルの第3層膜83（屈折率 $n_1 = 2.072$ 、膜厚 $B d_1$ ）、アルミナの第4層膜84（屈折率 $n_2 = 1.636$ 、膜厚 $B d_2$ ）、酸化タンタルの第5層膜85（屈折率 $n_1 = 2.072$ 、膜厚 $C d_1$ ）、アルミナの第6層膜86（屈折率 $n_2 = 1.636$ 、膜厚 $C d_2$ ）、酸化タンタルの第7層膜87（屈折率 $n_1 = 2.072$ 、膜厚 $D d_1$ ）、アルミナの第8層膜88（屈折率 $n_2 = 1.636$ 、膜厚 $D d_2$ ）が積層されている。さらに、この8層膜80は、空気等の自由空間5に接している。

【0280】

この半導体光素子の端面部の8層反射膜80の反射特性について説明する。まず、ここでは設定波長 808 nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 4.0% にする。各パラメータを、 $A = 0.22$ 、 $B = 2.00$ 、 $C = 2.16$ 、 $D = 2.00$ とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 0.44218$ 、 $\phi_2 = 1.18776$ である場合に、波長 808 nm で反射率 4.0% が得られる。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 5\text{ nm} / 20.54\text{ nm} / 54.89\text{ nm} / 186.73\text{ nm} / 59.28\text{ nm} / 201.67\text{ nm} / 54.89\text{ nm} / 186.73\text{ nm}$ である。全体の膜厚（ $d_{\text{total}} = \sum d_i$ ）は 769.73 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 2355.68 nm であり、所定波長 808 nm の $1/4$ 波長（ $=202\text{ nm}$ ）の約 11.66 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0281】

図117は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の 4.0% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 800 nm から 1032 nm にわたって反射率は 2.7% から 5.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 808 nm の反射率 4.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、 $2.5\% \sim 5.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 232 nm である。この波長帯域幅を設定波長 808 nm で割った値は約 0.287 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0282】

実施の形態106.

本発明の実施の形態106に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図118を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態105に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 716\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 4.0% として、パラメータを $A = 0.17$ 、 $B = 2.03$ 、 $C = 2.24$ 、としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.455795$ 、 $\phi_2 = 1.15938$ とすることによって波長 716 nm で反射率 4.0% とすることができる。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 5\text{ nm} / 13.73\text{ nm} / 50.89\text{ nm} / 163.94\text{ nm} /$

56.15 nm/180.89 nm/50.01 nm/161.11 nmである。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は681.72 nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2115.46 nmであり、所定波長808 nmの1/4波長 (=202 nm) の約10.47倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0283】

図118は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の4.0%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長709 nmから906 nmにわたって反射率は3.0%から5.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長716 nmの設定反射率4.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、2.5%~5.0%の範囲の連続した波長帯域幅は197 nmである。この波長帯域幅を設定波長716 nmで割った値は約0.275であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0284】

実施の形態107.

本発明の実施の形態107に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図119を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態105に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 808$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を8.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 0.20$ 、 $B = 2.00$ 、 $C = 2.60$ 、 $D = 2.00$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.703895$ 、 $\phi_2 = 0.563728$ とすることによって波長808 nmで反射率8.0%とすることができる。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 5$ nm/8.86 nm/87.37 nm/88.62 nm/113.59 nm/115.21 nm/87.37 nm/88.62 nmである。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は594.64 nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2726.92 nmであり、所定波長808 nmの1/4波長 (=202 nm) の約13.50倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0285】

図119は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の8.0%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長647 nmから819 nmにわたって反射率は7.1%から9.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長808 nmの反射率8.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、6.5%~9.0%の範囲の連続した波長帯域幅は172 nmである。この波長帯域幅を設定波長808 nmで割った値は約0.213であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0286】

実施の形態108.

本発明の実施の形態108に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図120を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態107に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 891$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を8.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.707082$ 、 $\phi_2 = 0.56214$ とすることによって波長891 nmで反射率8.0%とすることができる。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 5$ nm/9.75 nm/96.79 nm/9

7.45 nm/125.82 nm/126.69 nm/96.79 nm/97.45 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 655.74 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、3016.09 nm であり、所定波長 808 nm の $1/4$ 波長 (= 202 nm) の約 14.93 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0287】

図 120 は、この 8 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 8 層反射膜は、所定反射率の 8.0% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 712 nm から 903 nm にわたって反射率は 7.0% から 9.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 891 nm の設定反射率 8.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、6.5% ~ 9.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 191 nm である。この波長帯域幅を設定波長 891 nm で割った値は約 0.214 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 8 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0288】

実施の形態 109.

本発明の実施の形態 109 に係る 8 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 121 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 105 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 808$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 12.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 0.10$ 、 $B = 2.53$ 、 $C = 2.75$ 、 $D = 2.00$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.549712$ 、 $\phi_2 = 0.58774$ とすることによって波長 808 nm で反射率 12.0% とすることができる。この場合、8 層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2/D d_1/D d_2 = 5$ nm/4.62 nm/86.32 nm/116.88 nm/93.82 nm/127.05 nm/68.24 nm/92.40 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 594.33 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2352.26 nm であり、所定波長 808 nm の $1/4$ 波長 (= 202 nm) の約 11.64 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0289】

図 121 は、この 8 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 8 層反射膜は、所定反射率の 12.0% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 617 nm から 821 nm にわたって反射率は 10.6% から 13.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 808 nm の反射率 12.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、10.5% ~ 13.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 204 nm である。この波長帯域幅を設定波長 808 nm で割った値は約 0.252 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 8 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0290】

実施の形態 110.

本発明の実施の形態 110 に係る 8 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 122 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 109 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 909$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 12.0% として、パラメータ $B = 2.57$ としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.53932$ 、 $\phi_2 = 0.592482$ とすることによって波長 909 nm で反射率 12.0% とすることができる。この場合、8 層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2/D d_1/D d_2 = 5$ nm

／5.24 nm／96.78 nm／134.65 nm／103.56 nm／144.08 nm／75.31 nm／104.79 nmである。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は669.41 nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2618.82 nmであり、所定波長808 nmの1/4波長 (= 202 nm) の約12.96倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0291】

図122は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の12.0%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長693 nmから923 nmにわたって反射率は10.5%から13.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長909 nmの設定反射率12.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、10.5%～13.0%の範囲の連続した波長帯域幅は230 nmである。この波長帯域幅を設定波長909 nmで割った値は約0.253であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が高い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0292】

以下に、実施の形態85から実施の形態98に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表10に示した。表10には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 λ 及び設定反射率 $R(\lambda)$ 、極小反射率、 $\sum n_i d_i$ 及び所定波長808 nmの1/4波長(202 nm)との対比、 $R(\lambda)$ の-1.5～+1.0%の範囲となる波長帯域幅 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\lambda/\lambda$ について示した。

【0293】

【表 10】

表 10

実施 の 形態	多層反射膜の特性					
	多層反 射膜の 構成	設定波長 λ 設定反射率 $R(\lambda)$	極小反 射率	$\sum n_i d_i$ 、 波長 808nm の 1/4 波 長 (202nm) と の 対比	$R(\lambda)$ の -1.5~1.0% となる波長 帯域 $\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$
99	8層膜	808nm 4%	2.6%	2108.54nm 10.44 倍	139nm	139/808= 0.172
100	8層膜	744nm 4%	2.5%	1949.67nm 9.65 倍	131nm	131/744= 0.101
101	8層膜	808nm 8%	6.6%	2177.34nm 10.78 倍	145nm	145/808= 0.179
102	8層膜	753nm 8%	6.7%	2024.36nm 10.02 倍	124nm	124/753= 0.165
103	8層膜	808nm 12%	10.7%	2264.47nm 11.21 倍	236nm	236/808= 0.292
104	8層膜	706nm 12%	10.9%	2005.83nm 9.93 倍	201nm	201/706= 0.285
105	8層膜	808nm 4%	2.7%	2355.68nm 11.66 倍	232nm	232/808= 0.287
106	8層膜	716nm 4%	3.0%	2115.46nm 10.47 倍	197nm	197/716= 0.275
107	8層膜	808nm 8%	7.1%	2726.92nm 13.50 倍	172nm	172/808= 0.213
108	8層膜	891nm 8%	7.0%	3016.09nm 14.93 倍	191nm	191/891= 0.214
109	8層膜	808nm 12%	10.6%	2352.26nm 11.64 倍	204nm	204/808= 0.252
110	9層膜	909nm 10%	10.5%	2618.82nm 12.96 倍	230nm	230/909= 0.253

【0294】

以上、本発明を説明する実施の形態において、7層反射膜、6層反射膜、9層反射膜及び8層反射膜をその一例として挙げて説明したが、本発明はこれらに限定されるものではない。多層反射膜はこれ以外の複数層であってもよい。3種類の材料を用いる場合を示したが、4種類以上の材料の場合も予め位相条件を与えることで同様に取り扱える。なお、3種類の材料の一例として窒化アルミニウム (AlN) を厚さ 50 nm、とした例、アルミナ (Al₂O₃) を 10 nm、あるいは石英 (SiO₂) を 5 nm 設けた場合をそれぞれ示したが材料及び膜厚はこれに限るものではない。また、一対のアルミナ及び酸化タンタルの2層膜、酸化タンタル及び石英の2層膜等の寄与を示す O, A, B, C, D 等のパラメータの値は上記実施の形態に示した値に限定されるものではない。さらに、半導体光素子として半導体レーザ素子の場合を例に挙げたが、これに限られず、本発明は半導体光増幅器、スーパーluminescent・ダイオード、光変調器、光スイッチ等の光デバイスにも適用することができる。また、波長として 980 nm 近傍及び 808 nm 近傍に限定されるものではなく、可視光領域、遠赤外領域、赤外領域においても適用できる。さらに、反射率として約 2~12% の反射率の場合について説明したがその他の反射率でも適用できる。

【図面の簡単な説明】

【0295】

【図1】複素数表示による振幅反射率を示す複素平面図である。

【図2】端面に仮想単層反射膜を有する半導体光素子の構造を示す概略断面図である。

【図3】図2の仮想単層反射膜を2層膜で置き換えた場合の本発明に係る半導体光素子の構造を示す概略断面図である。

【図4】図2の仮想単層反射膜を4層膜で置き換えた場合の本発明に係る半導体光素子の構造を示す概略断面図である。

【図5】本発明の実施の形態1に係る半導体光素子の端面部の構造を示す概略断面図である。

【図6】本発明の実施の形態1に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図7】本発明の実施の形態2に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図8】端面部に形成された仮想単層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図9】本発明の実施の形態3に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図10】本発明の実施の形態4に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図11】本発明の実施の形態5に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図12】本発明の実施の形態6に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図13】本発明の実施の形態7に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図14】本発明の実施の形態8に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図15】本発明の実施の形態9に係る半導体光素子の端面部の構造を示す概略断面図である。

【図16】本発明の実施の形態9に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図17】本発明の実施の形態10に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図18】本発明の実施の形態11に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図19】本発明の実施の形態12に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図20】本発明の実施の形態13に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図21】本発明の実施の形態14に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図22】本発明の実施の形態15に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図23】本発明の実施の形態16に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図24】本発明の実施の形態17に係る半導体光素子の端面部の構造を示す概略断面図である。

【図25】本発明の実施の形態17に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図 50】本発明の実施の形態 40 に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図 7 5】本発明の実施の形態 6 5 に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図 100】本発明の実施の形態 90 に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図101】本発明の実施の形態91に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図102】本発明の実施の形態92に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図103】本発明の実施の形態93に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図104】本発明の実施の形態94に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図105】本発明の実施の形態95に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図106】本発明の実施の形態96に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図107】本発明の実施の形態97に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図108】本発明の実施の形態98に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図109】本発明の実施の形態99に係る半導体光素子の端面部の構造を示す概略断面図である。

【図110】本発明の実施の形態99に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図111】本発明の実施の形態100に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図112】本発明の実施の形態101に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図113】本発明の実施の形態102に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図114】本発明の実施の形態103に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図115】本発明の実施の形態104に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図116】本発明の実施の形態105に係る半導体光素子の端面部の構造を示す概略断面図である。

【図117】本発明の実施の形態105に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図118】本発明の実施の形態106に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図119】本発明の実施の形態107に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図120】本発明の実施の形態108に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図121】本発明の実施の形態109に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図122】本発明の実施の形態110に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【符号の説明】

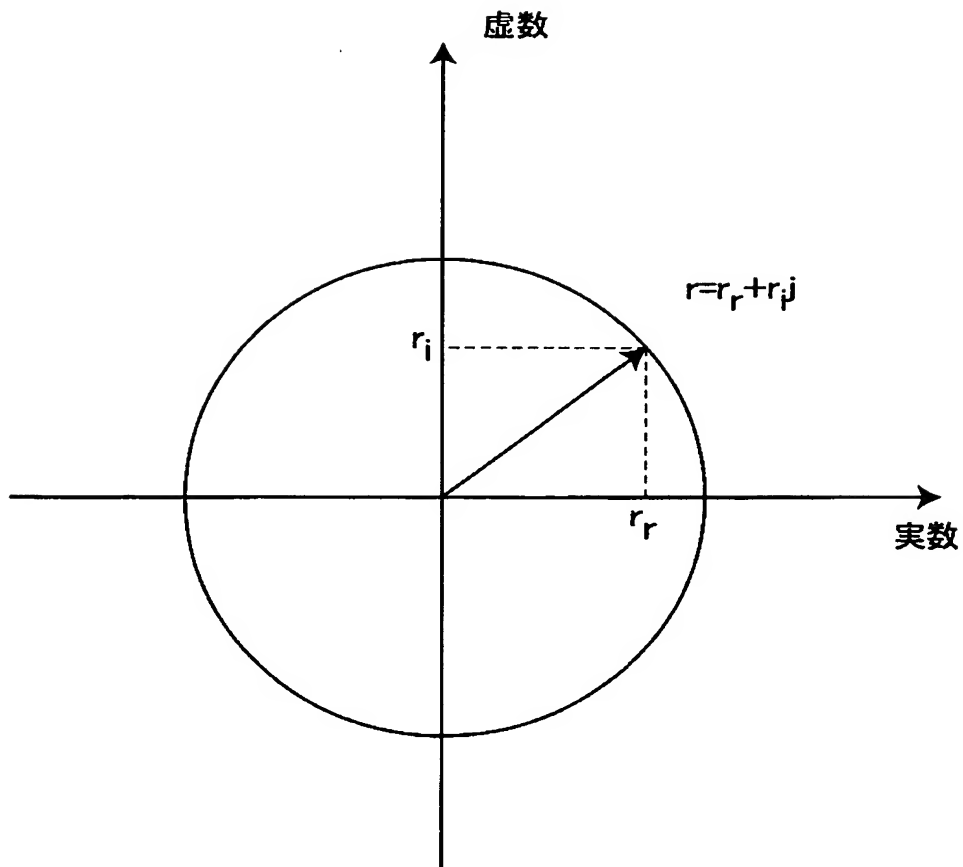
【0296】

- 1 第1層膜、2 第2層膜、3 第3層膜、4 第4層膜、5 自由空間（空気）、1
0 導波層、11、21、31、41、51 第1層膜、12、22、32、42、52
第2層膜、13、23、33、43、53 第3層膜、14、24、34、44、54
第4層膜、15、25、35、45、55 第5層膜、16、26、36、46、56

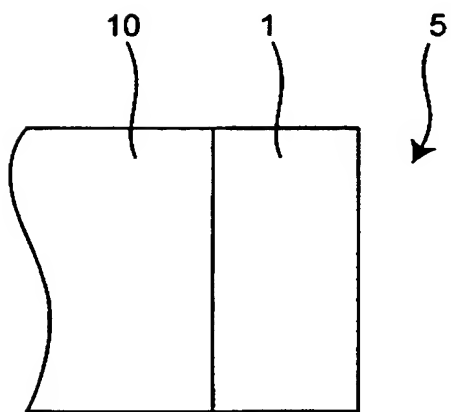
第 6 層膜、1 7、2 7、4 7、5 7 第 7 層膜、2 0 、7 層反射膜（第 1 層膜：アルミナ）、3 0 7 層反射膜（第 1 層膜：酸化タンタル）、4 0 6 層反射膜、5 0 7 層反射膜（窒化アルミニウム膜を含む）、5 8 第 8 層膜、5 9 第 9 層膜、6 0 9 層反射膜、7 0、8 0 8 層反射膜、7 1、8 1 第 1 層膜、7 2、8 2 第 2 層膜、7 3、8 3 第 3 層膜、7 4、8 4 第 4 層膜、7 5、8 5 第 5 層膜、7 6、8 6 第 6 層膜、7 7、8 7 第 7 層膜、7 8、8 8 第 8 層膜、1 0 0 導波層、1 0 1 反射膜、1 0 3 単層反射膜（膜厚 $d = \lambda / (4 n_1)$ ）、1 0 4 単層反射膜（膜厚 $d = 5 \lambda / (4 n_1)$ ）、

【書類名】 図面

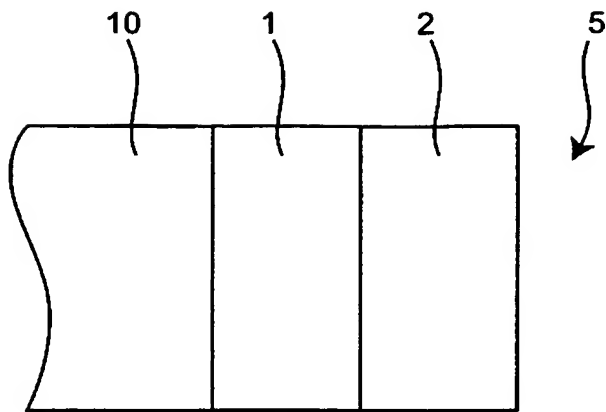
【図 1】



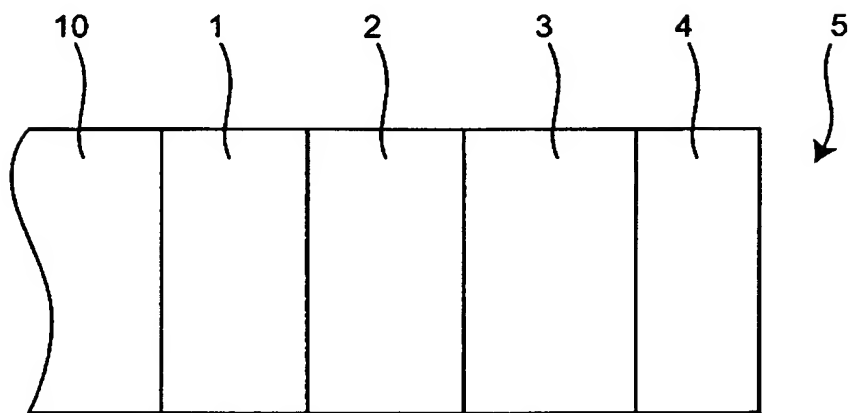
【図 2】



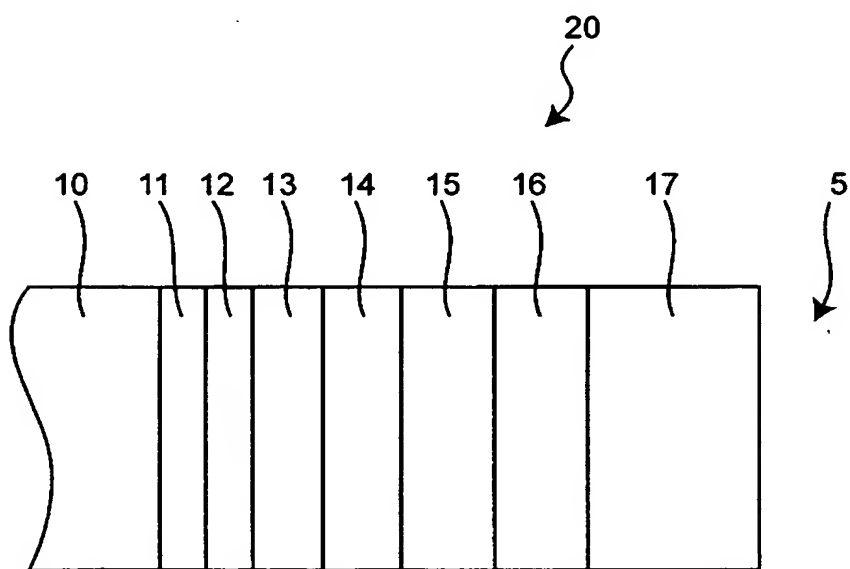
【図 3】



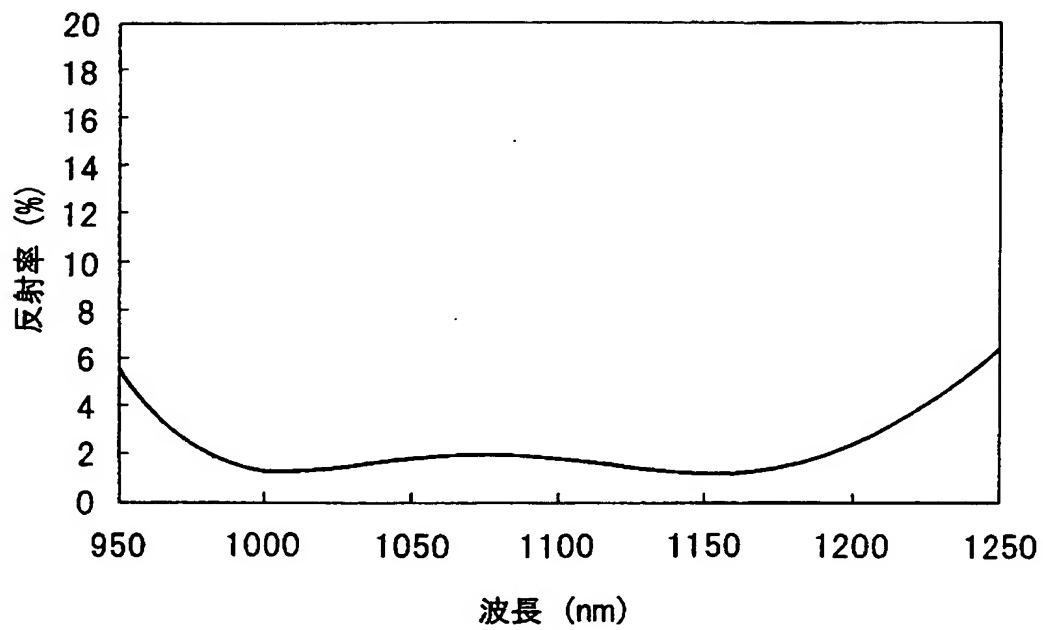
【図 4】



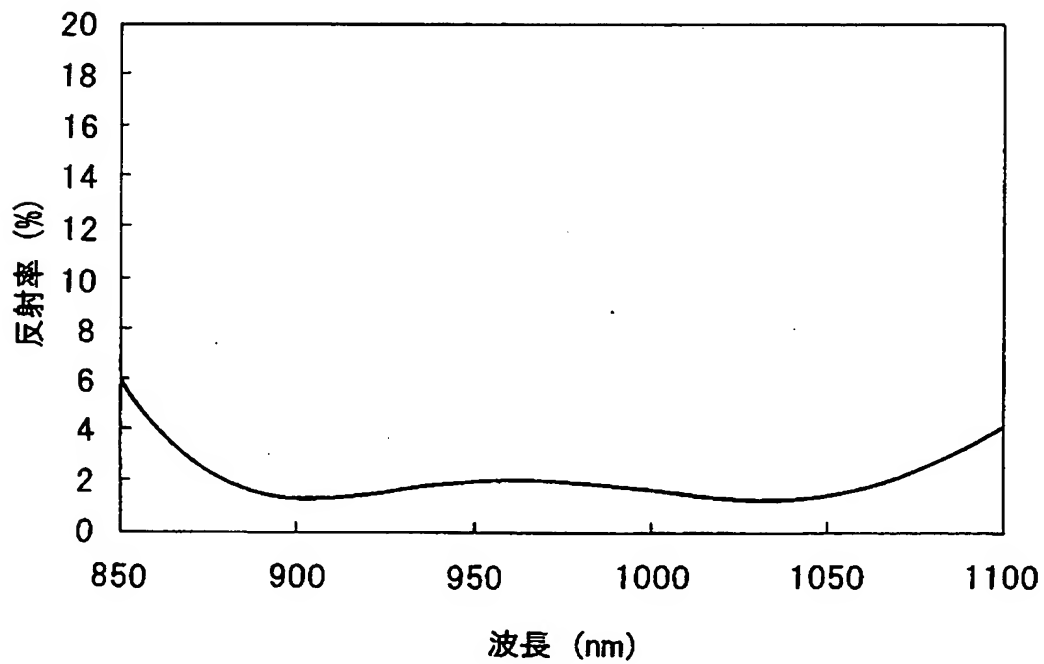
【図 5】



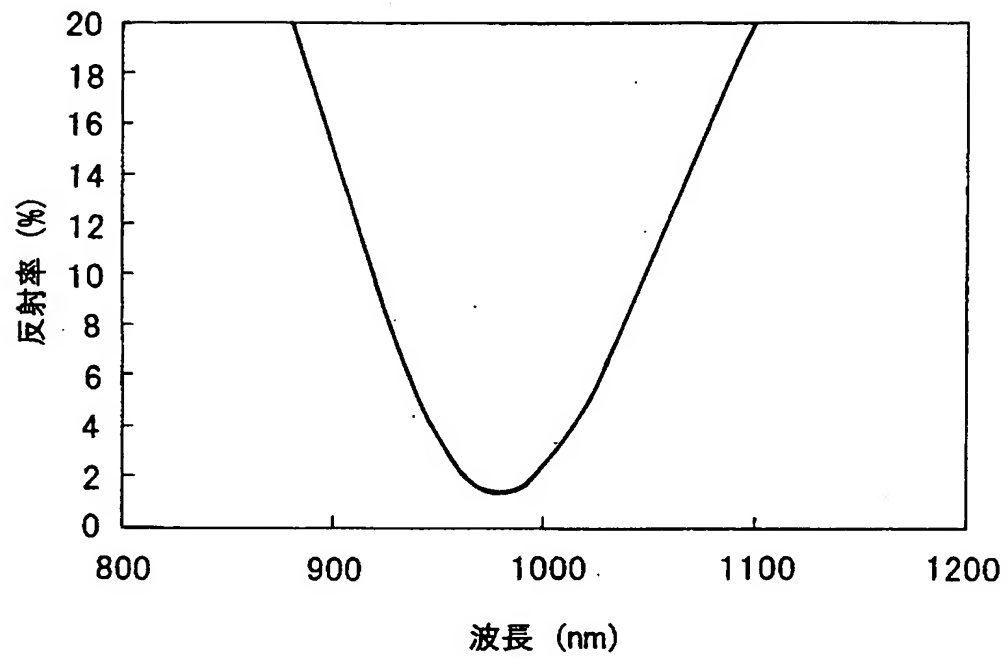
【図 6】



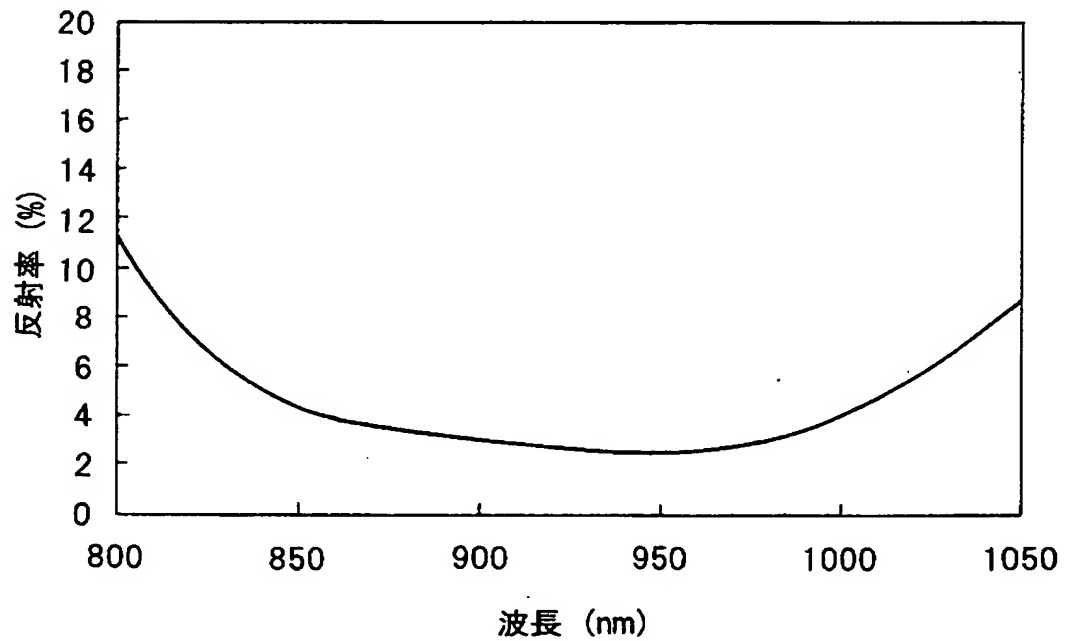
【図 7】



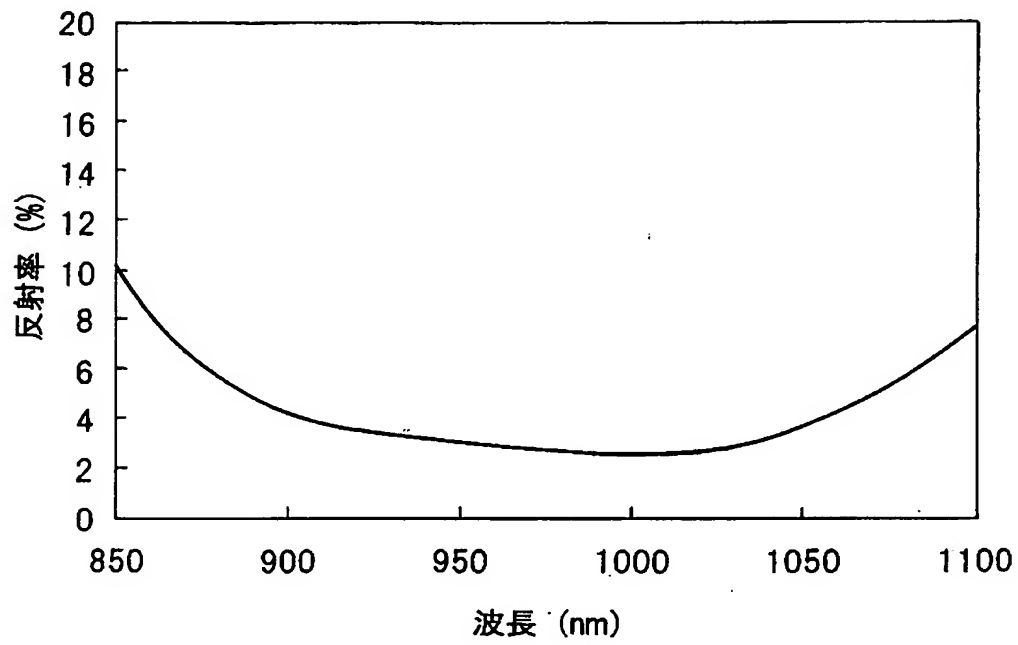
【図 8】



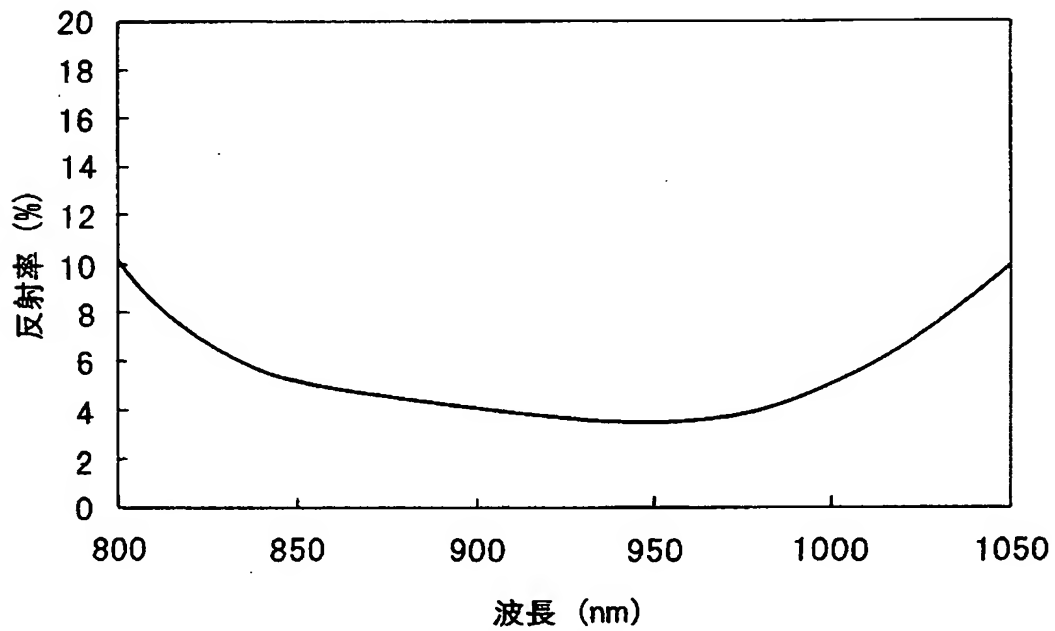
【図 9】



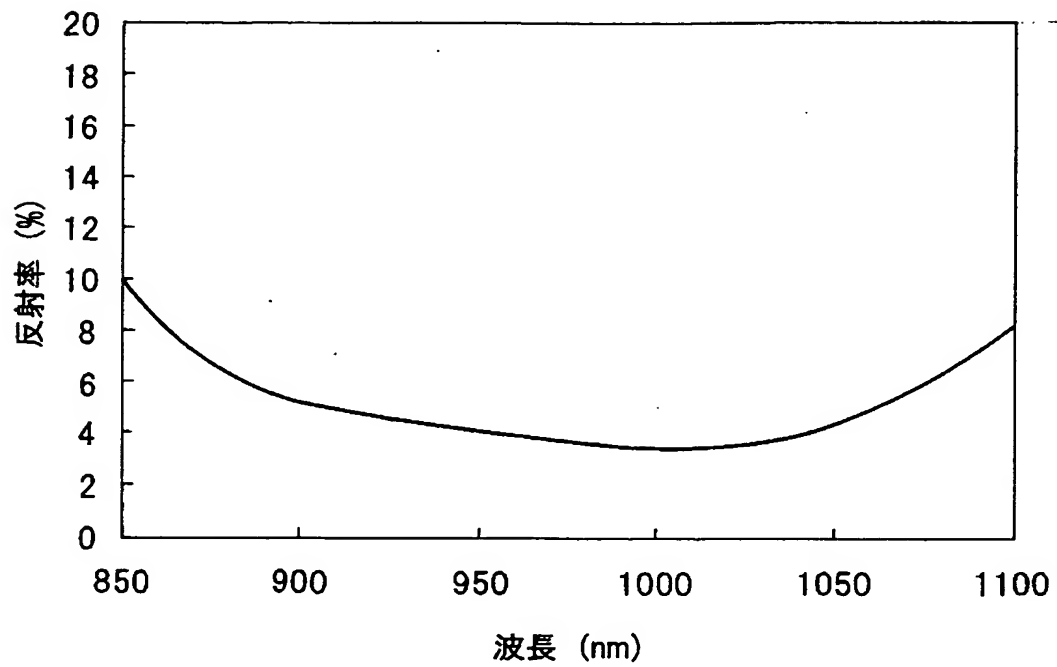
【図 10】



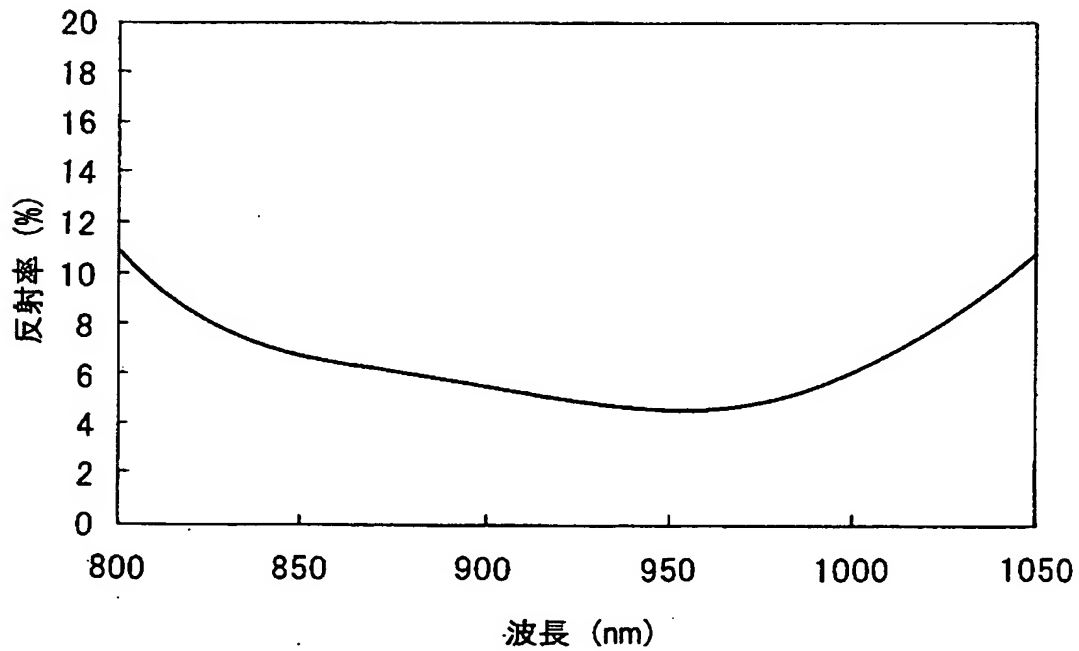
【図 11】



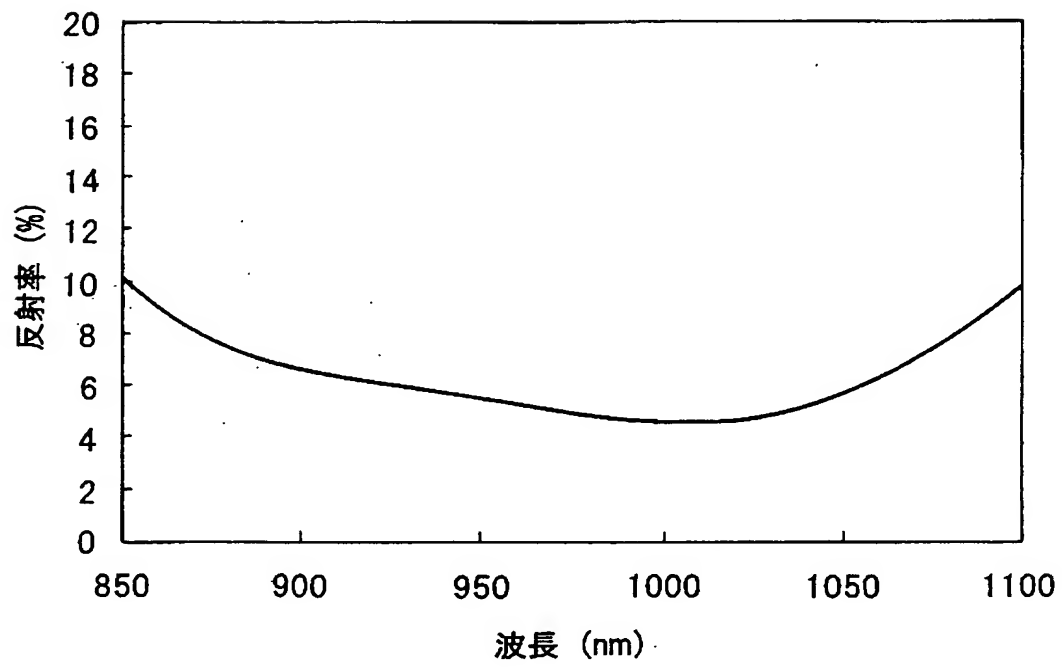
【図 12】



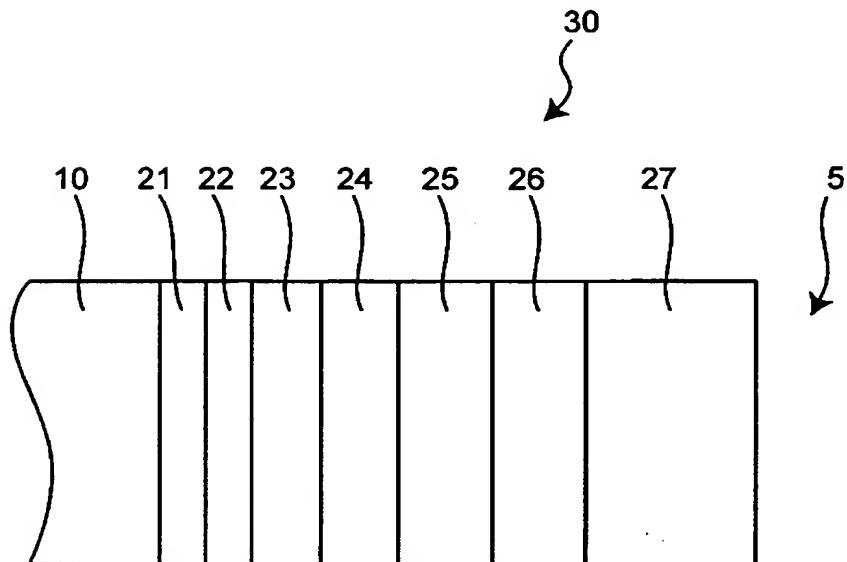
【図 13】



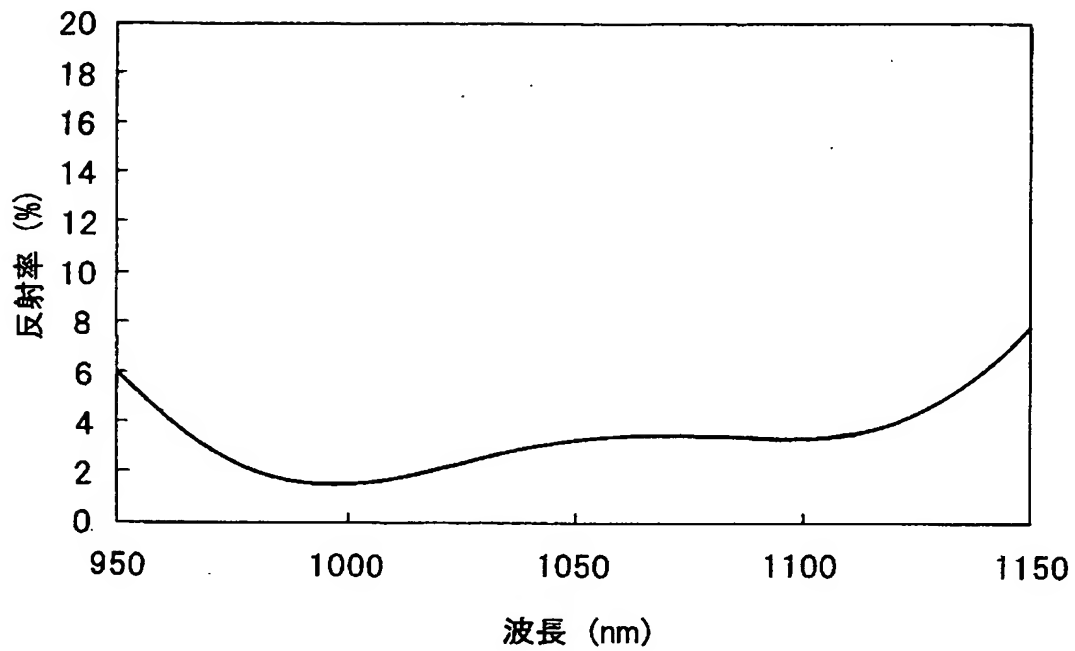
【図 14】



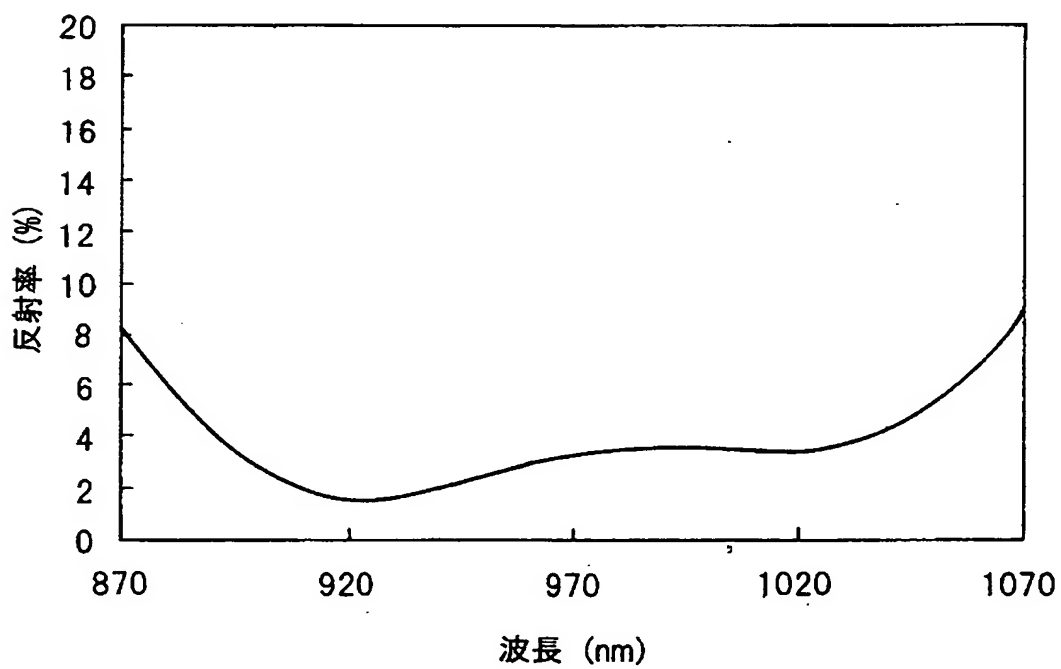
【図 15】



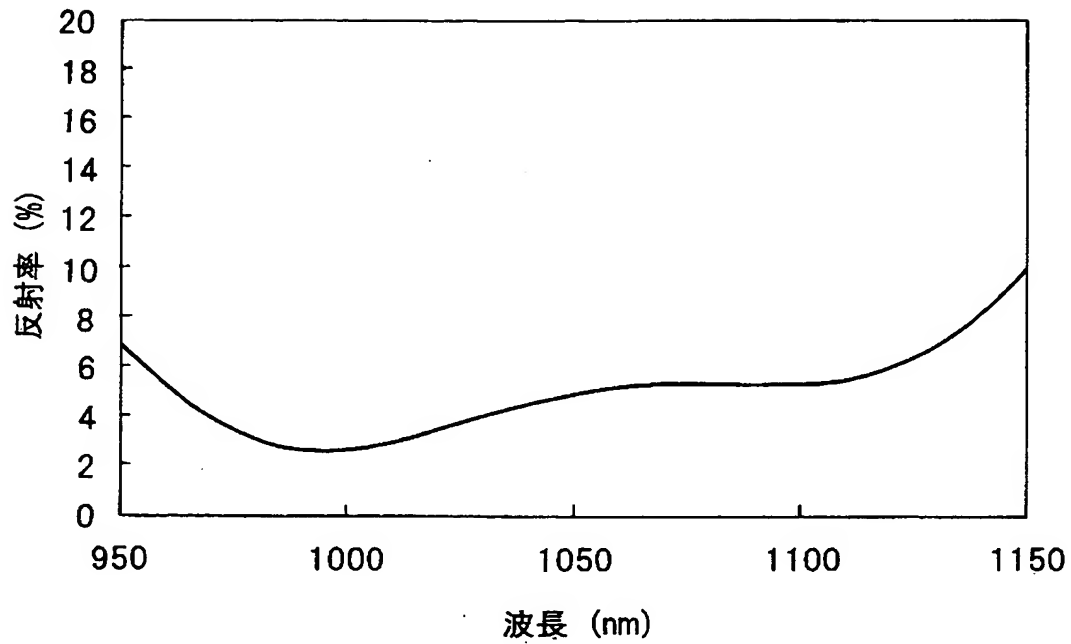
【図 16】



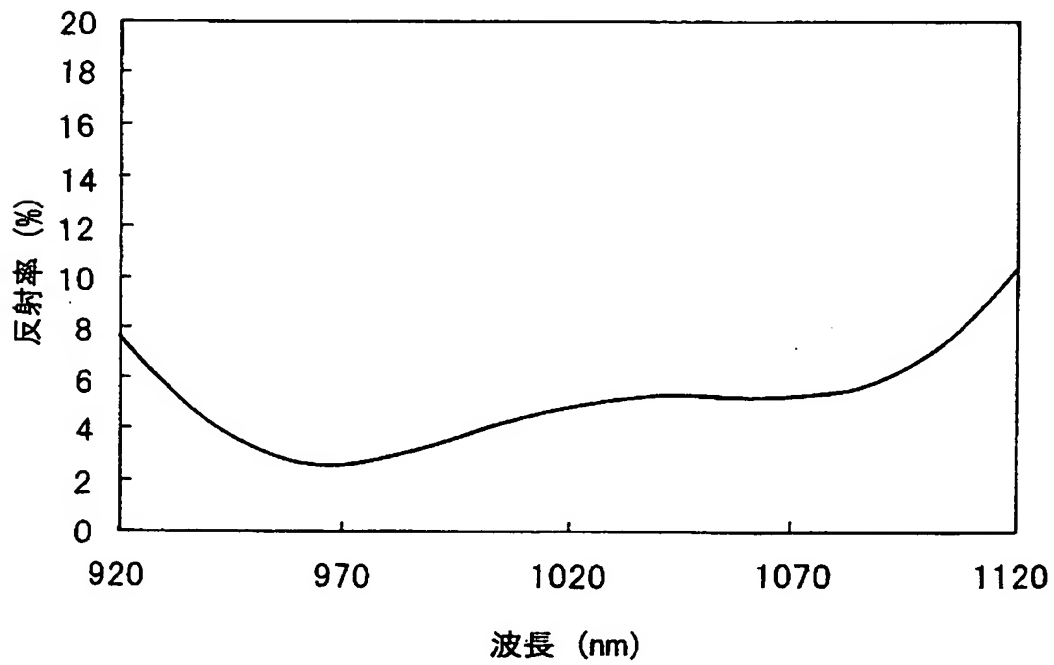
【図 17】



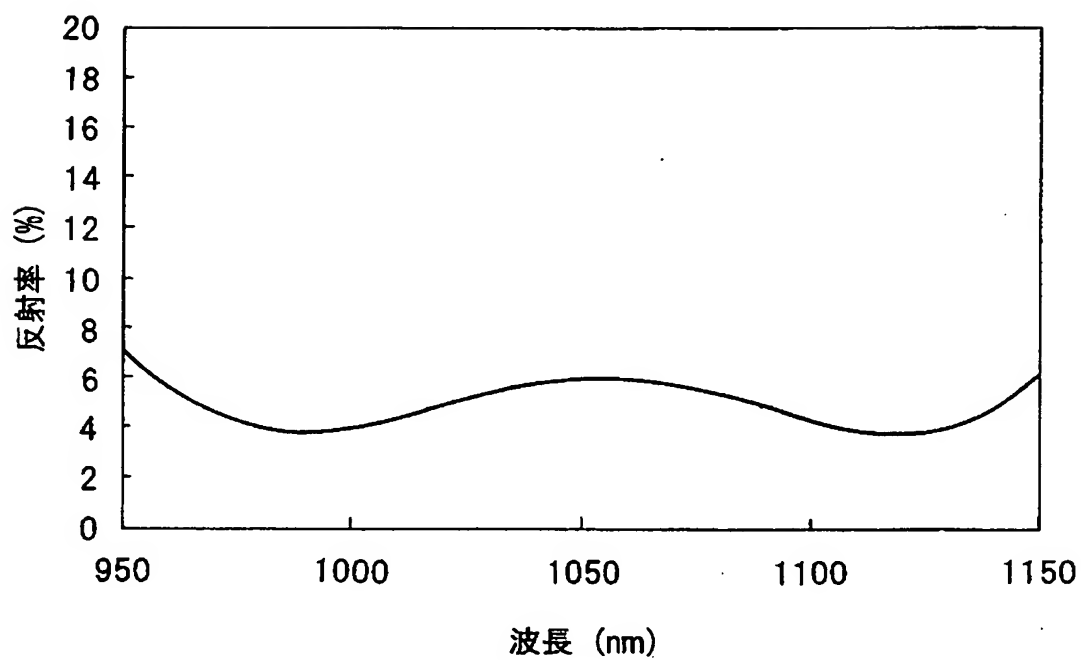
【図 18】



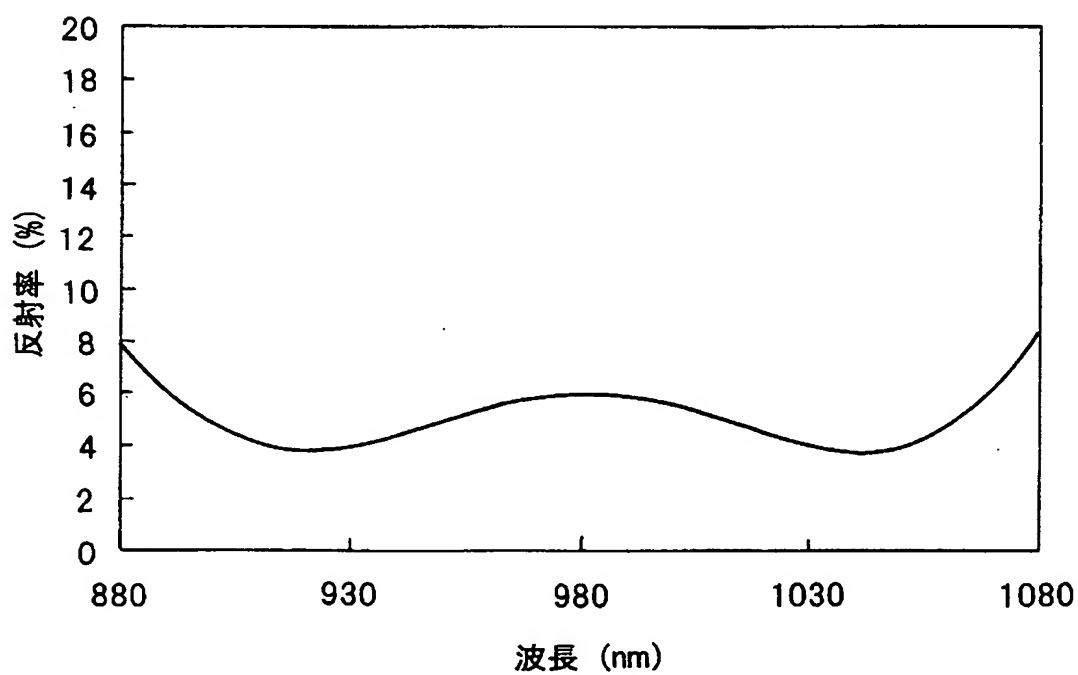
【図 19】



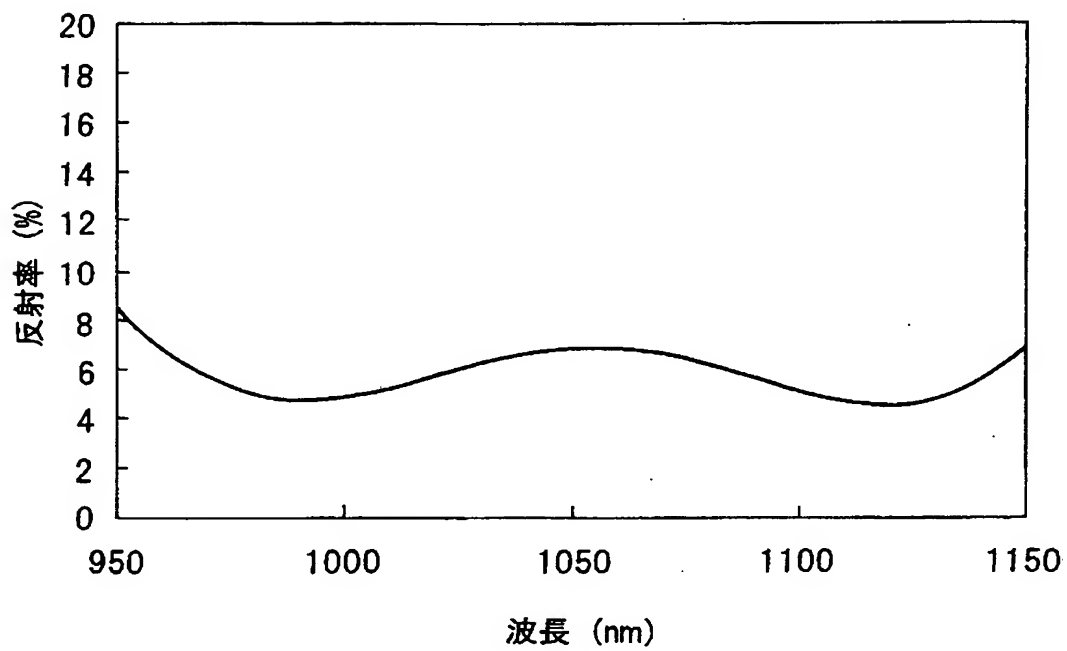
【図 20】



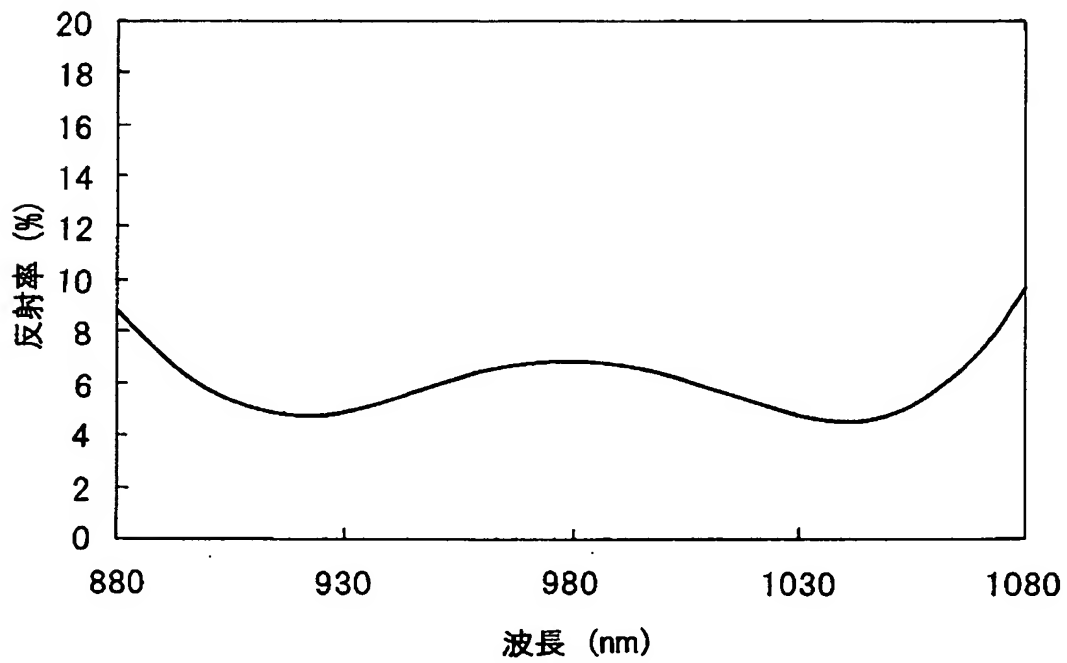
【図 21】



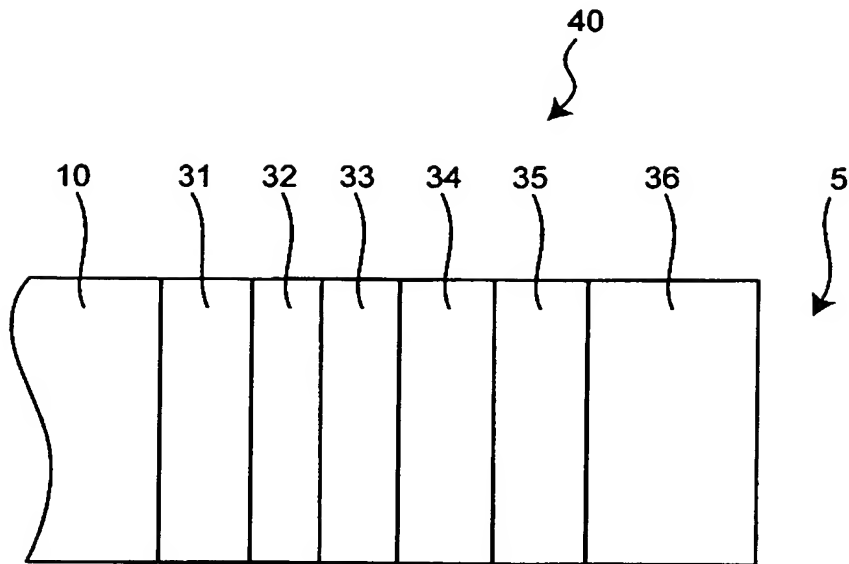
【図 2 2】



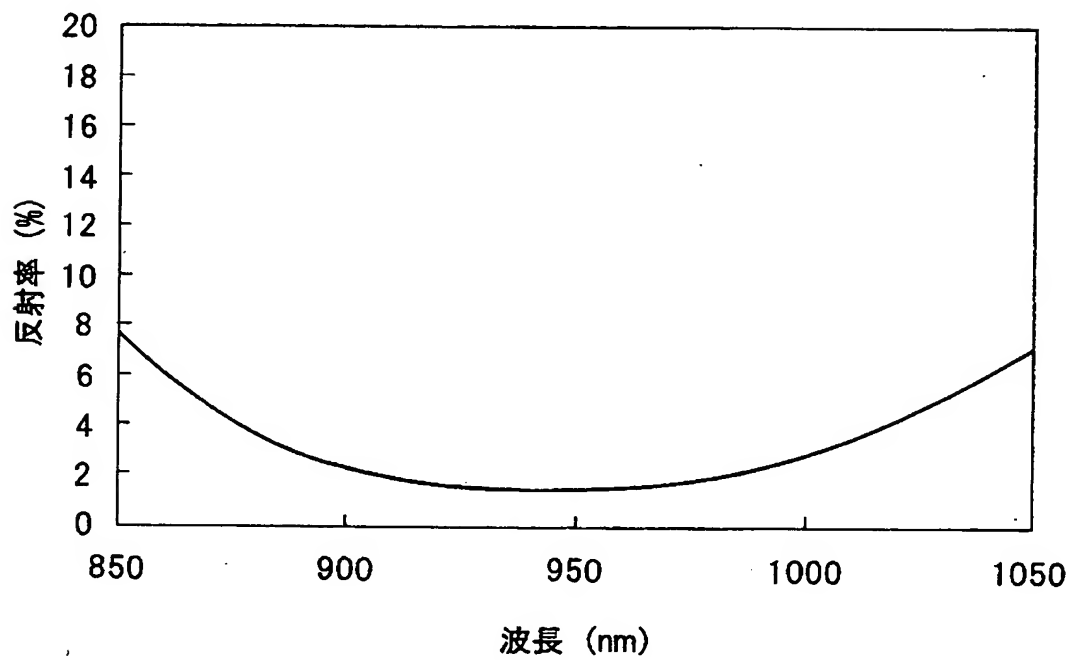
【図 2 3】



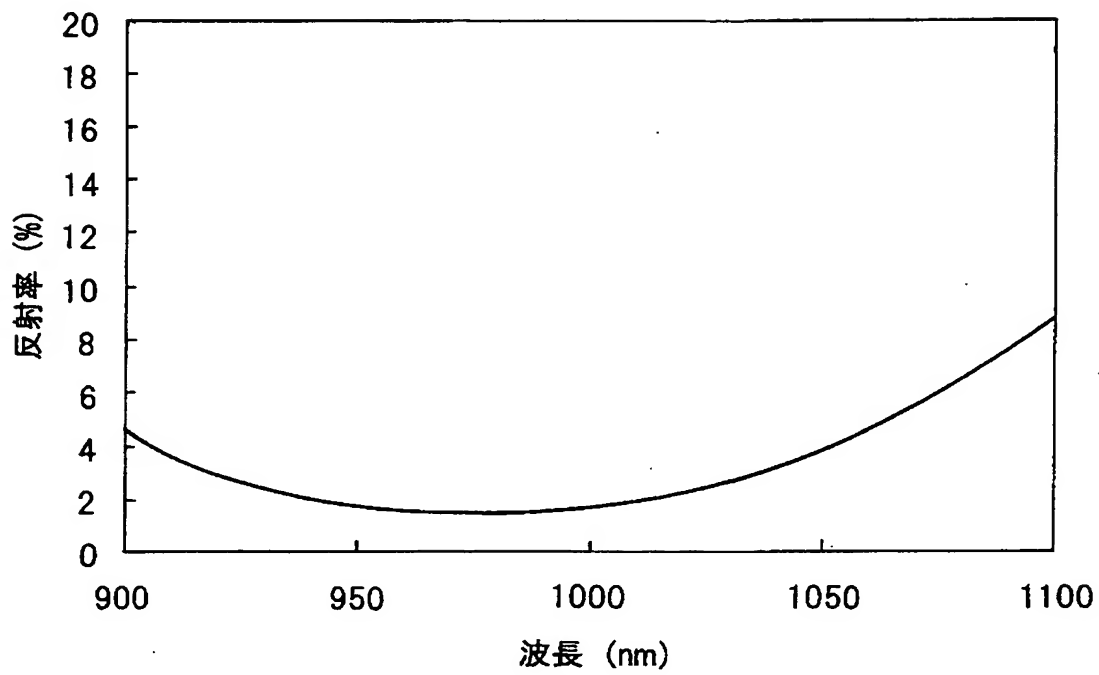
【図 2 4】



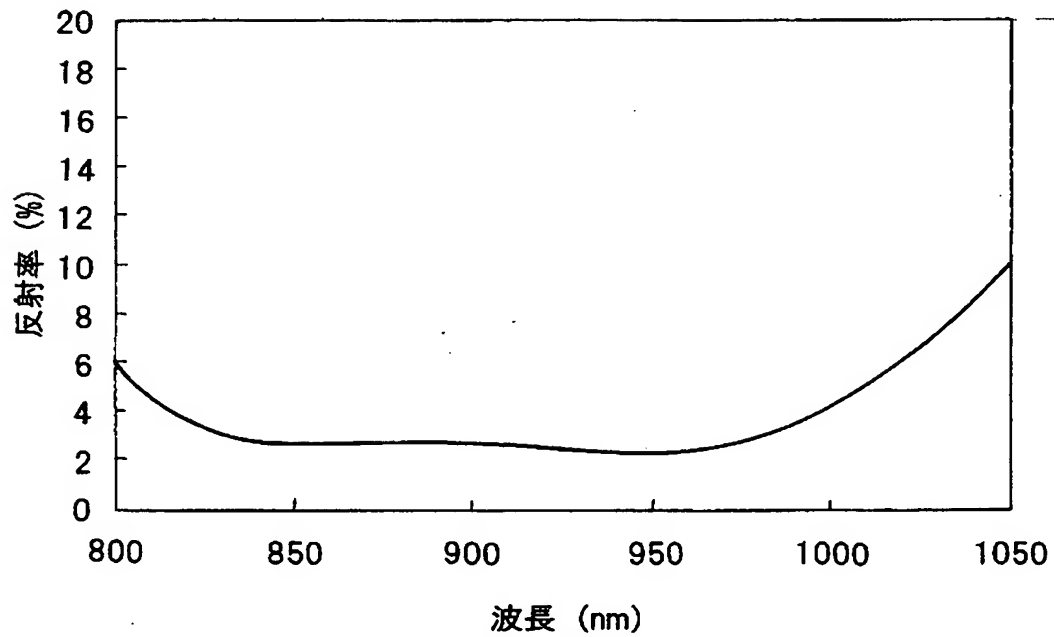
【図 2 5】



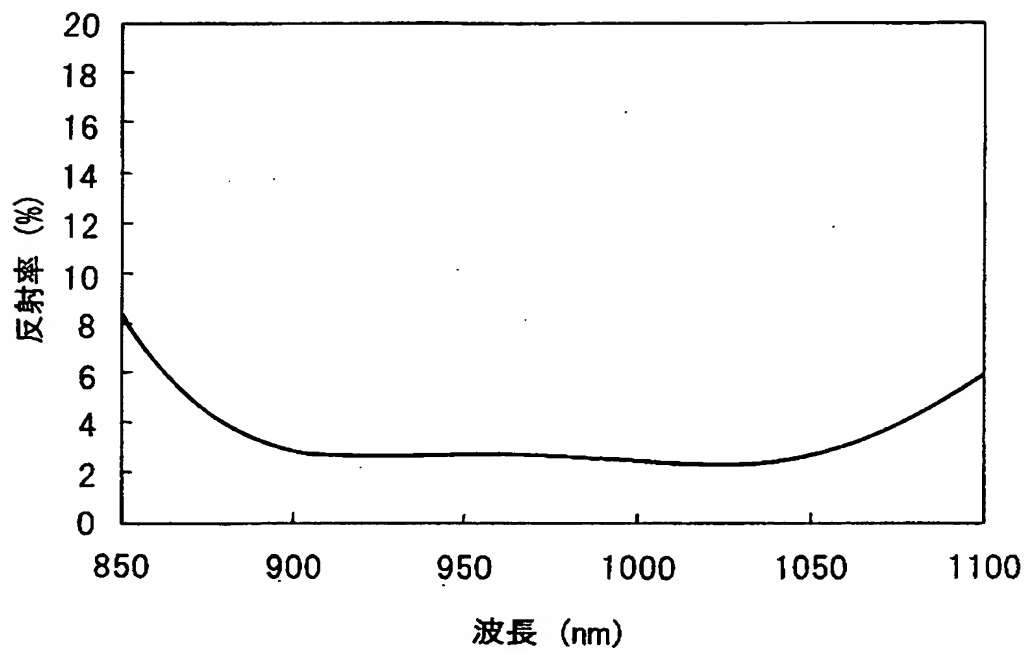
【図 26】



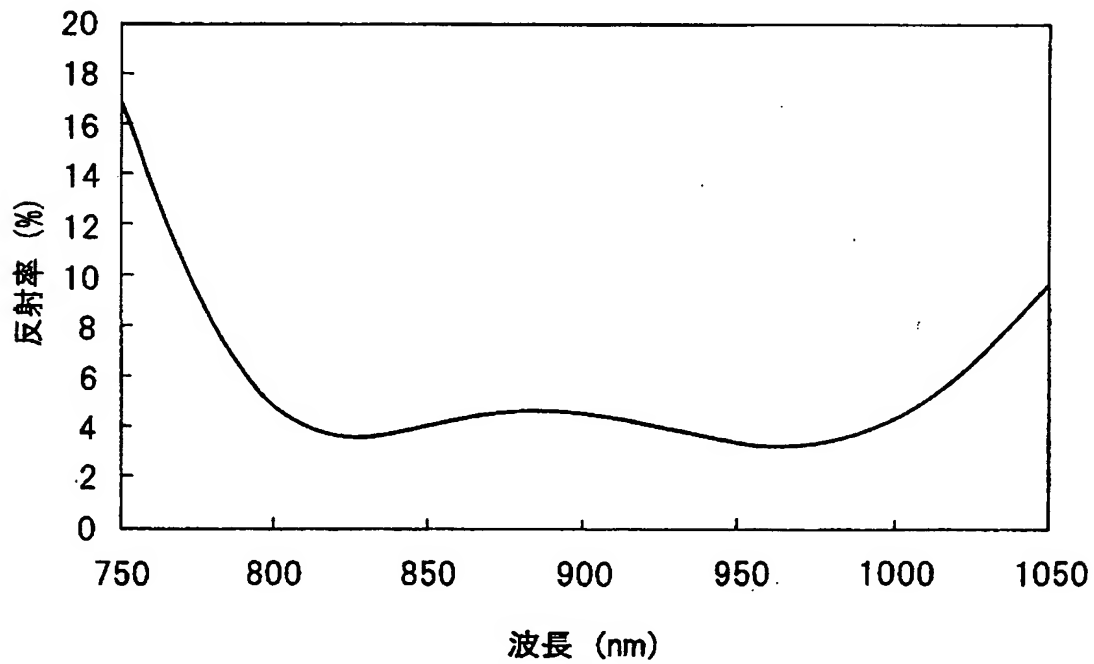
【図 27】



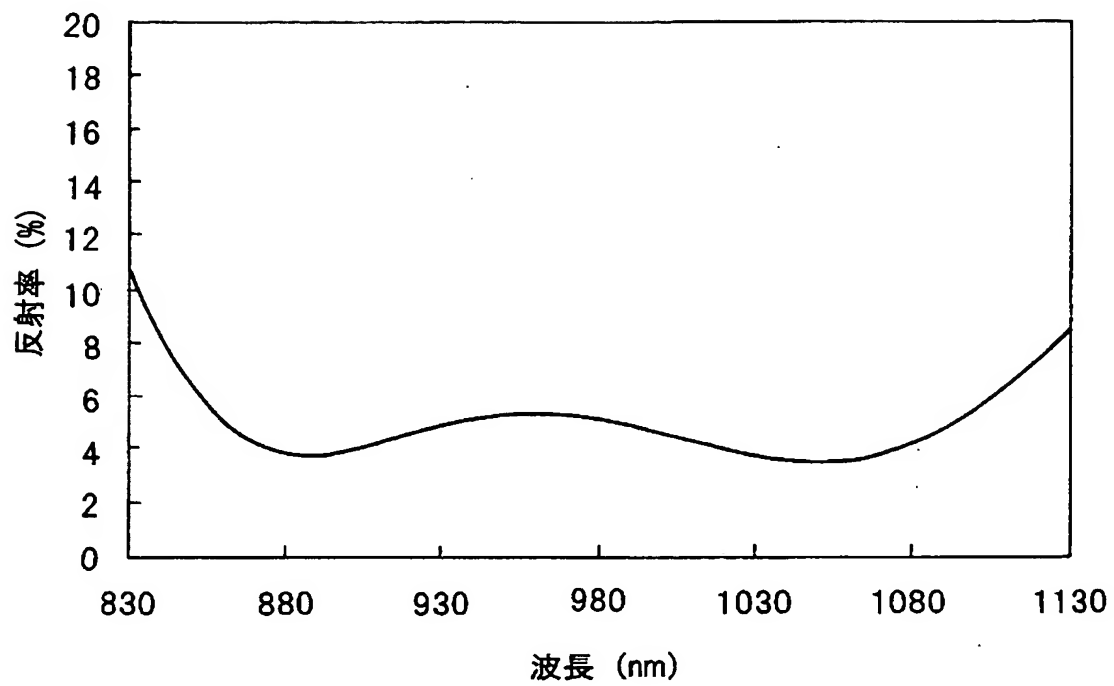
【図 28】



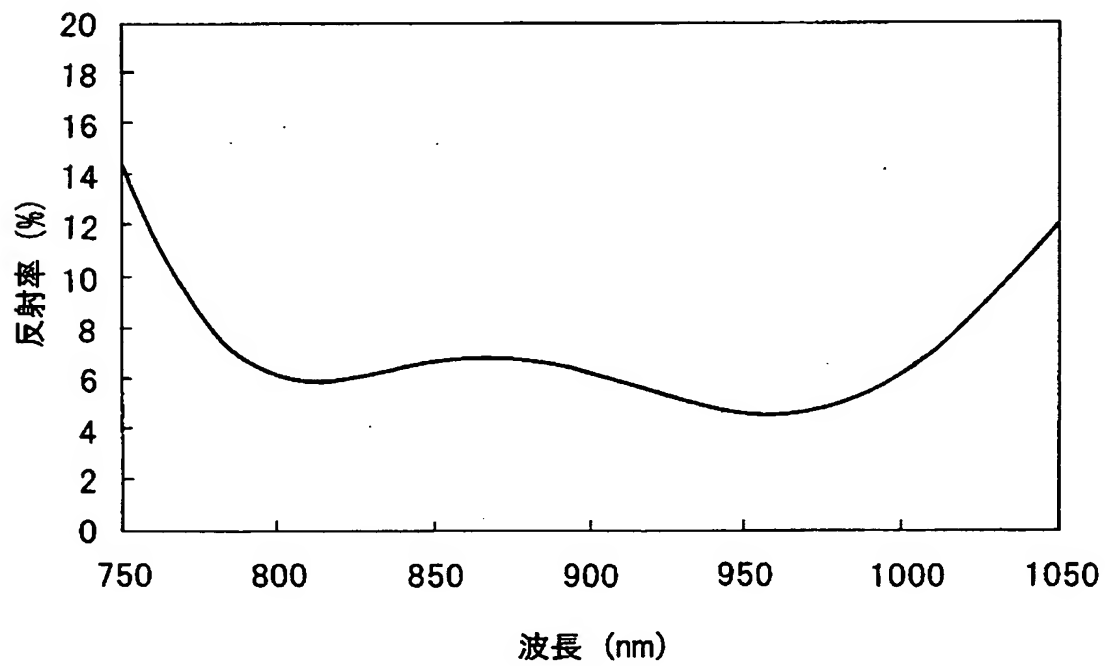
【図 29】



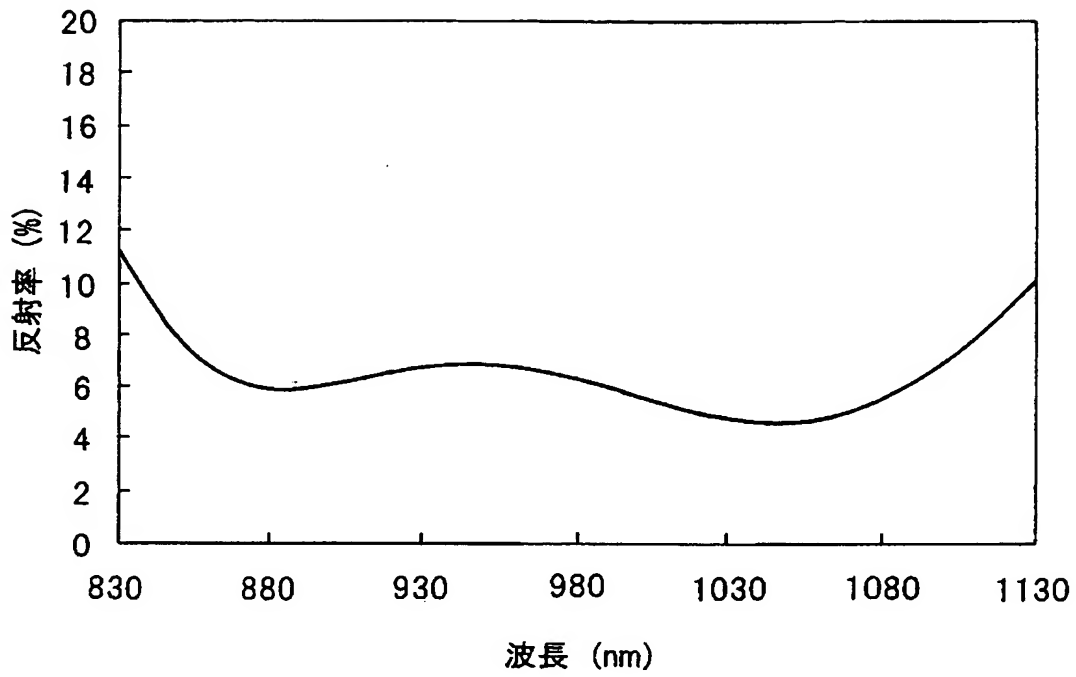
【図 30】



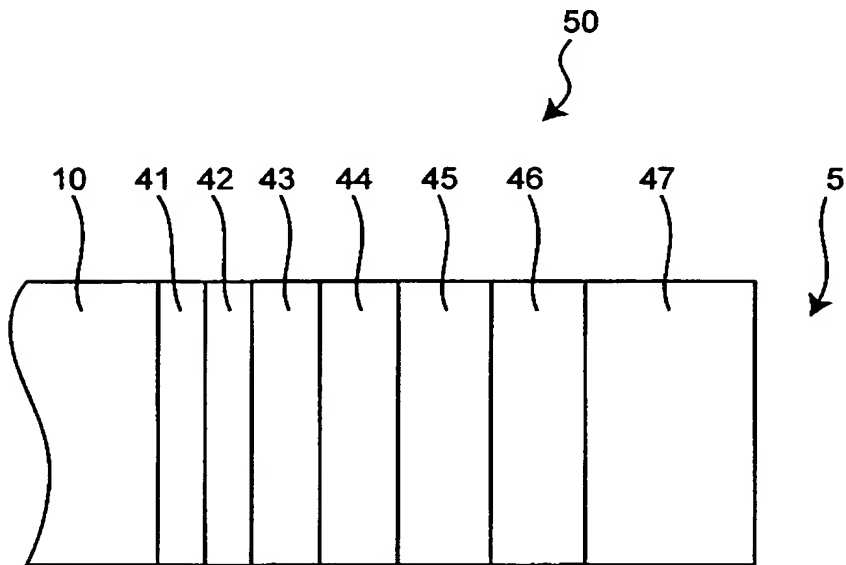
【図 31】



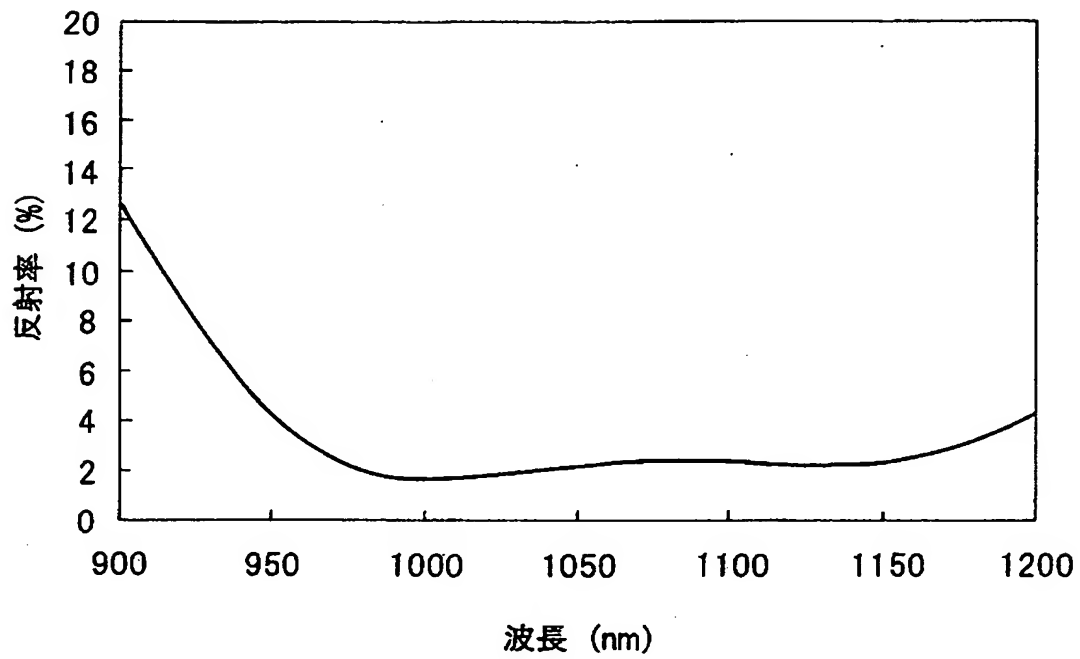
【図 3 2】



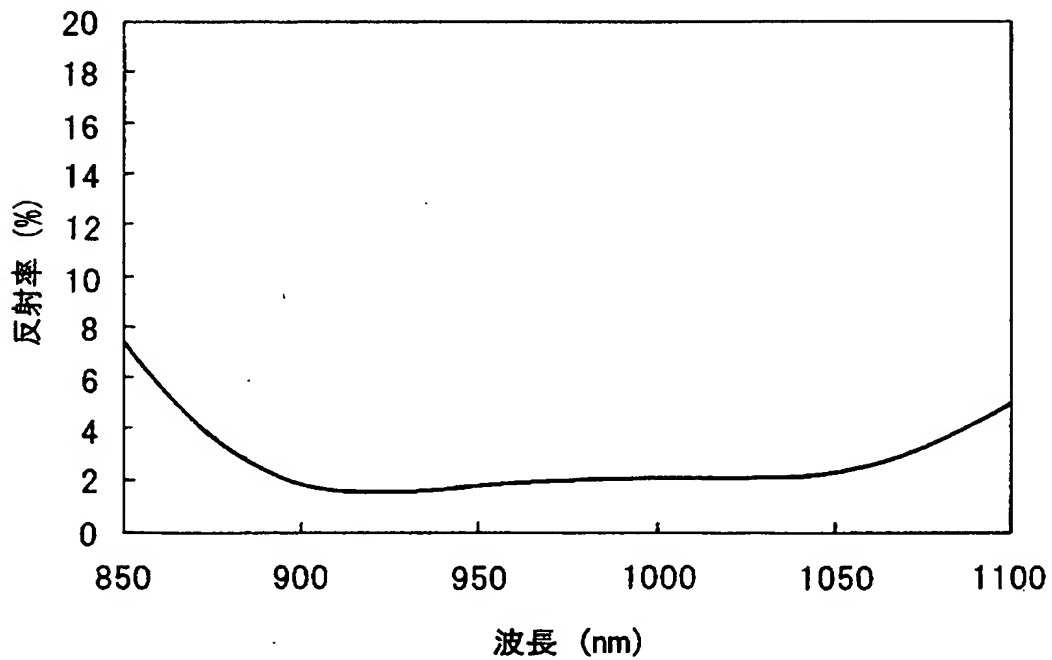
【図 3 3】



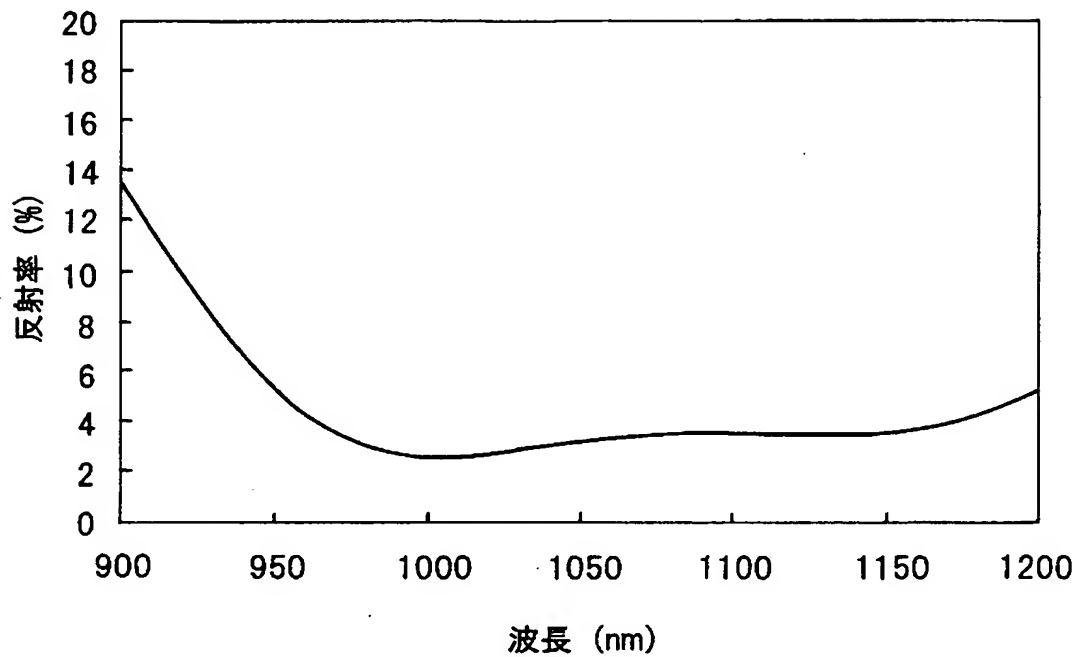
【図 3 4】



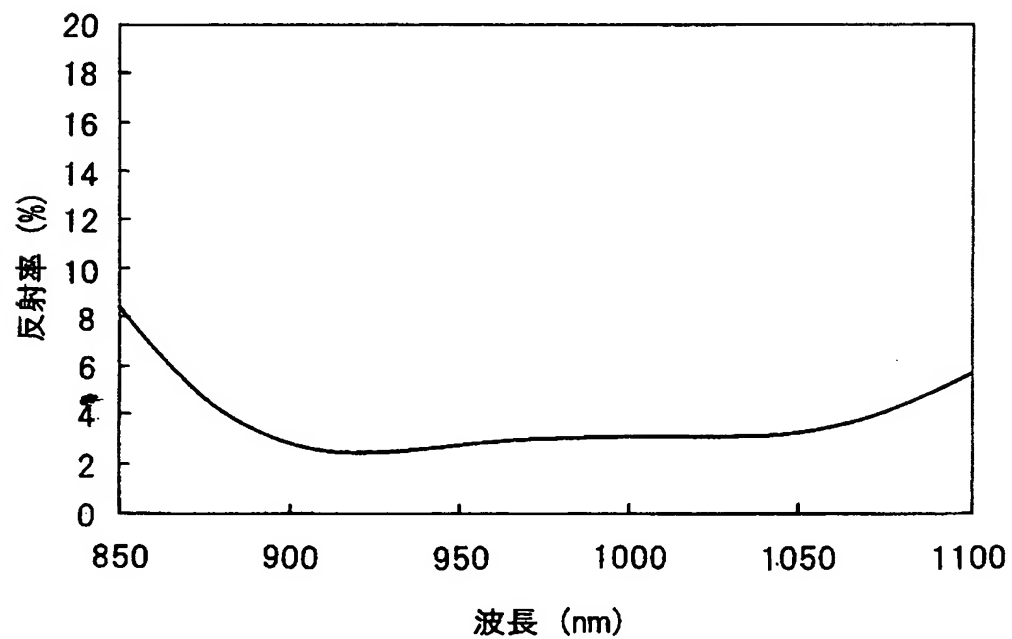
【図 3 5】



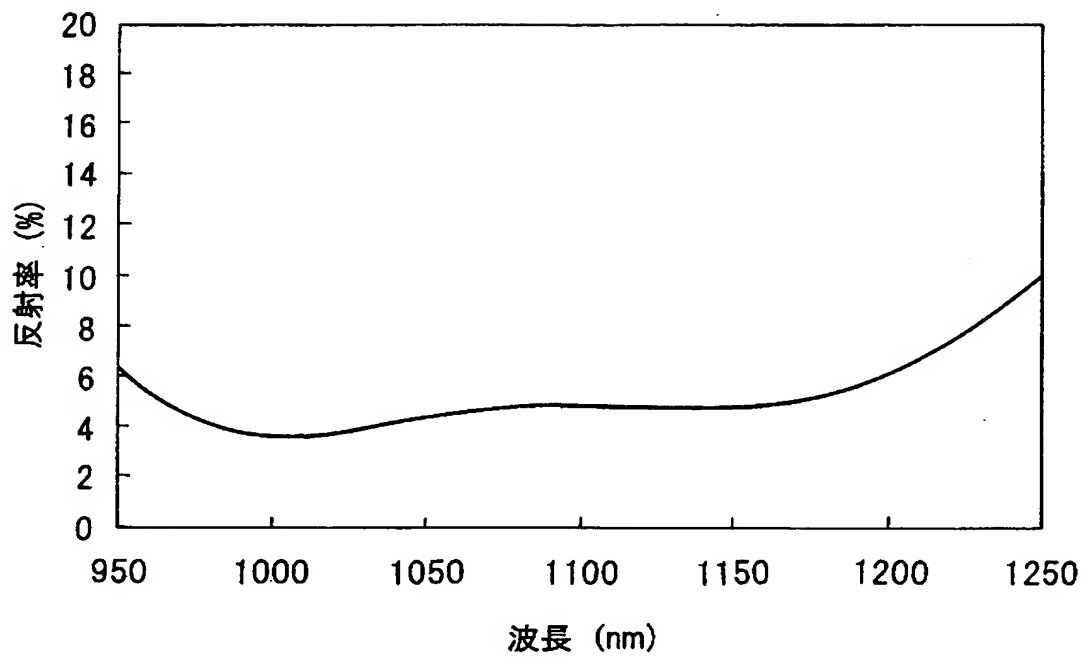
【図 3 6】



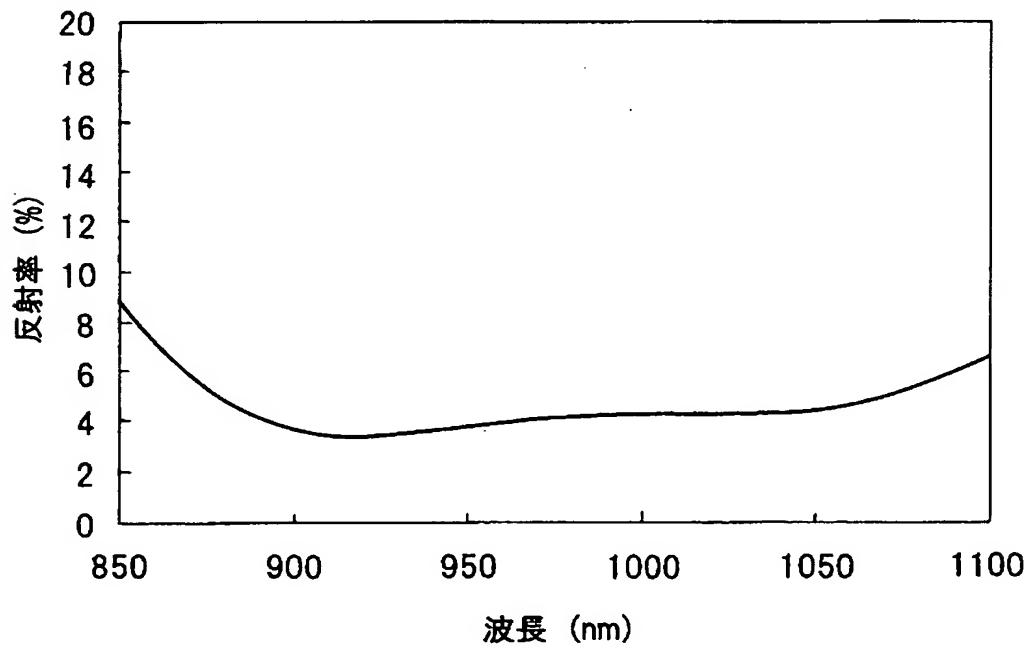
【図 3 7】



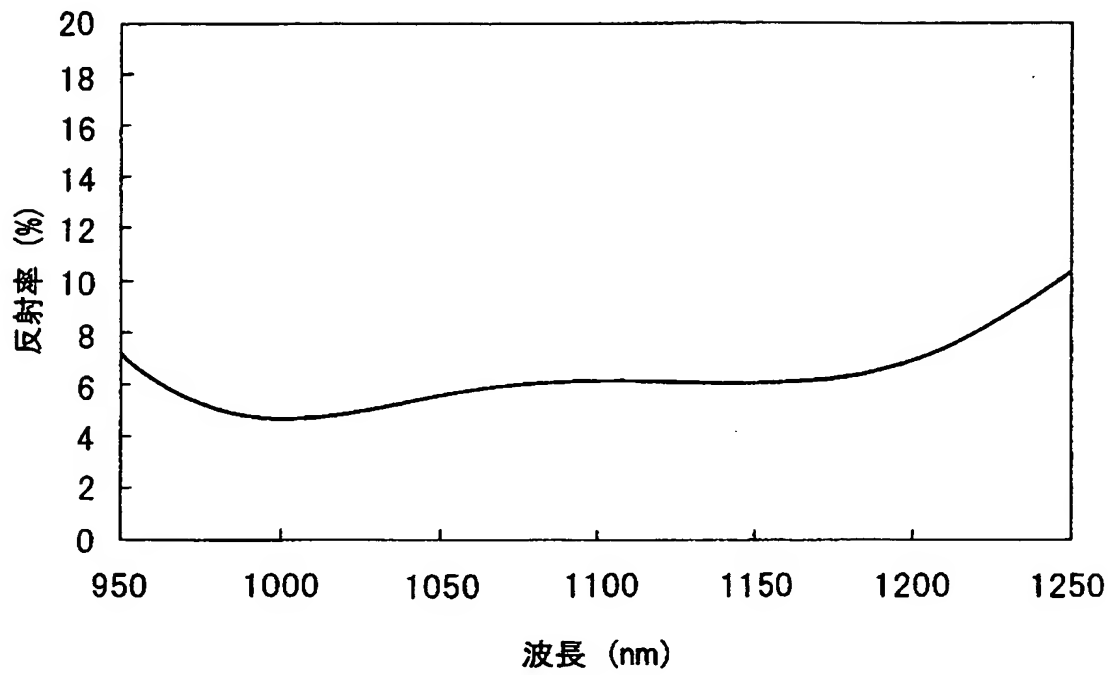
【図 38】



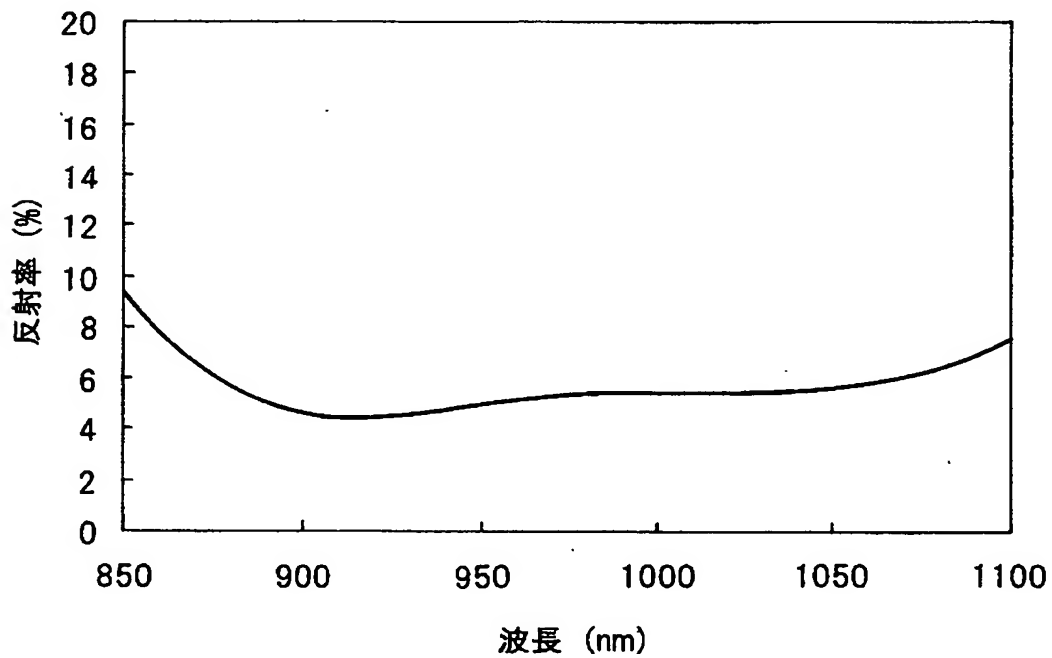
【図 39】



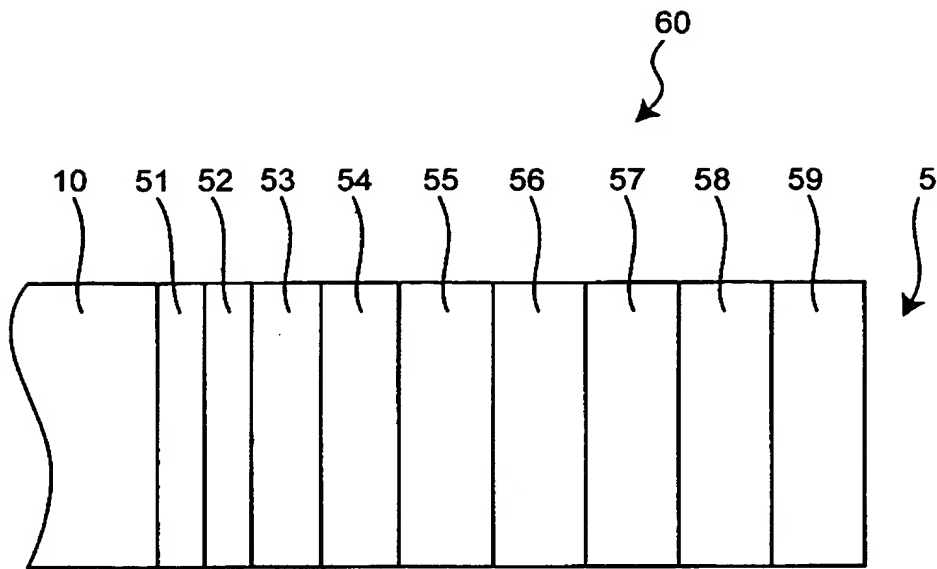
【図 40】



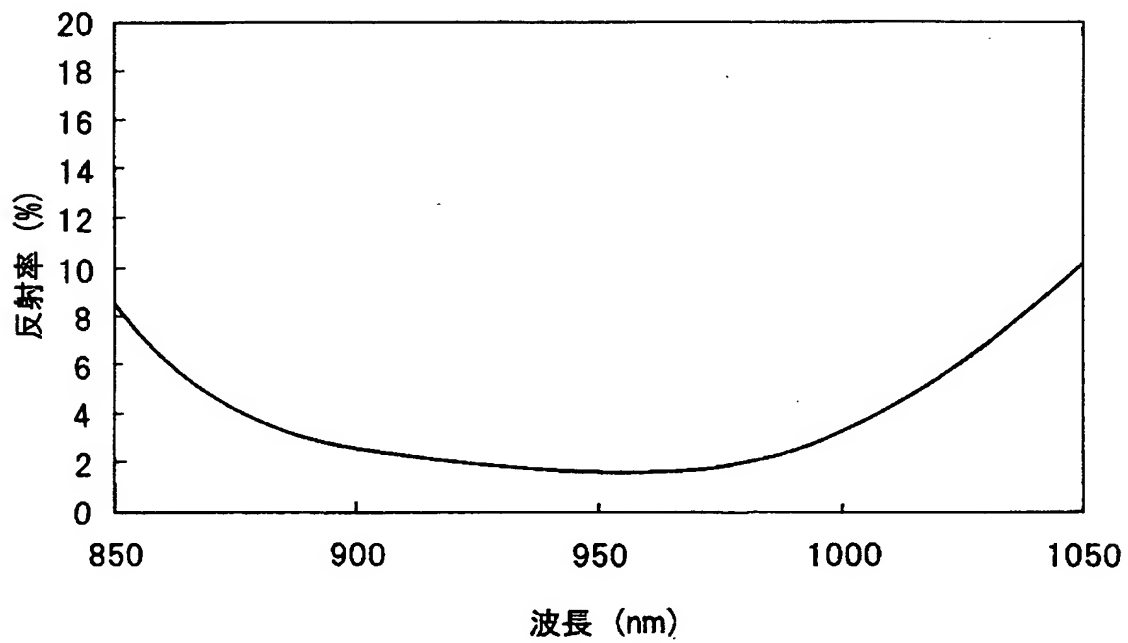
【図 41】



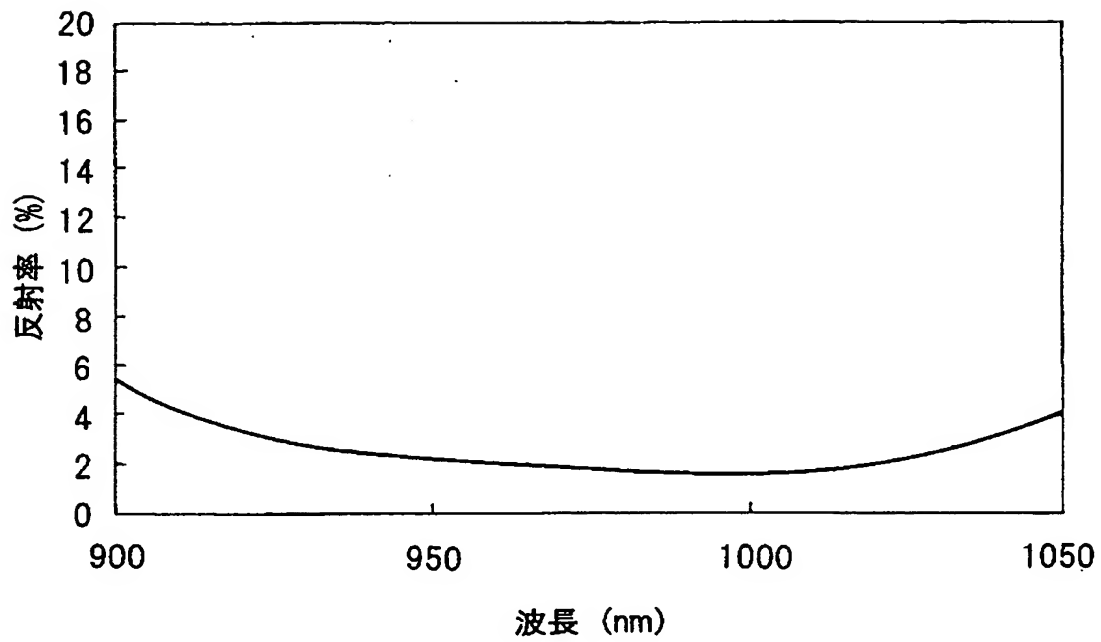
【図 4 2】



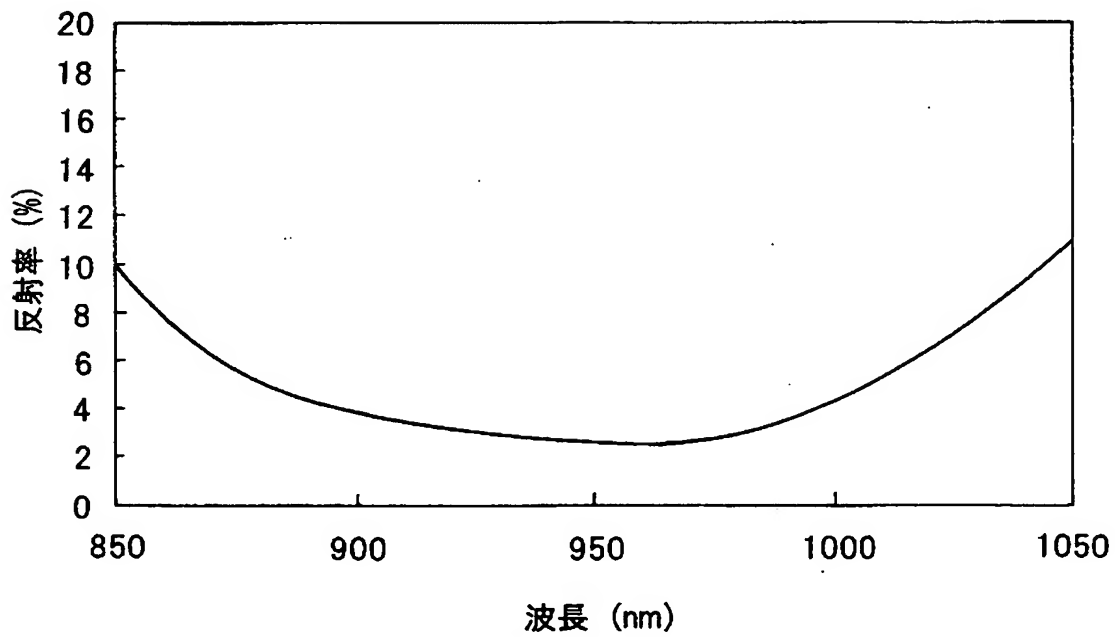
【図 4 3】



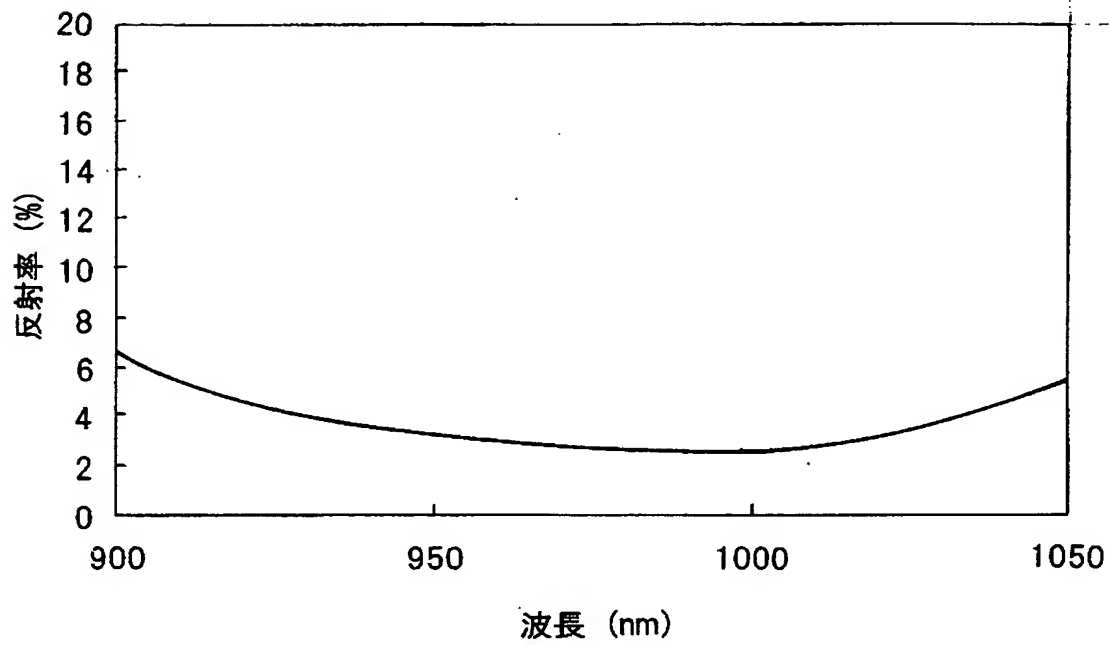
【図 4 4】



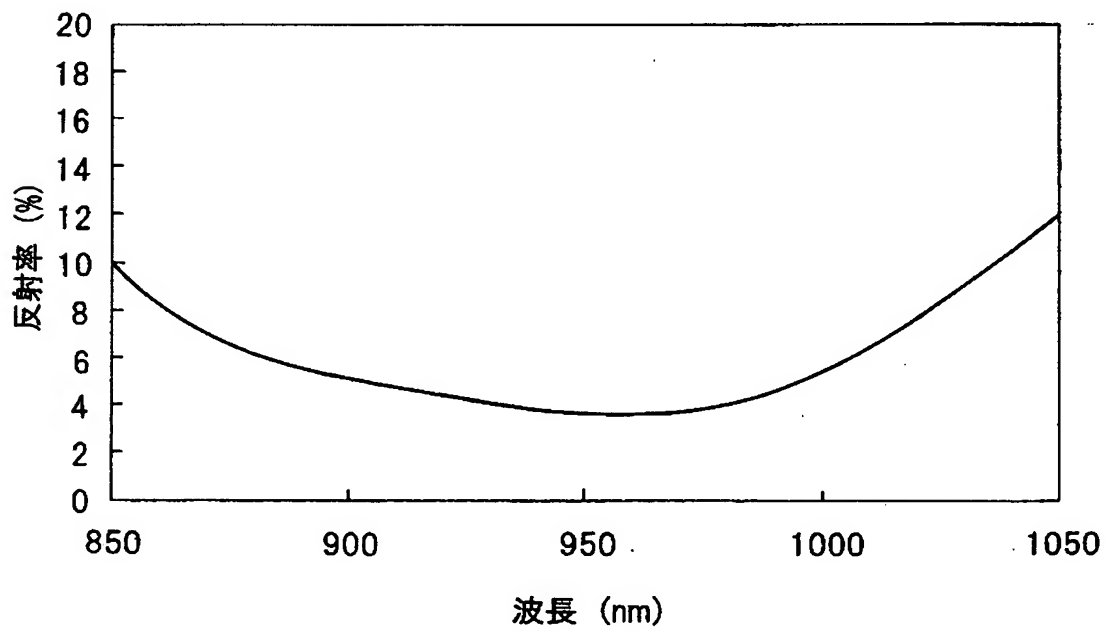
【図 4 5】



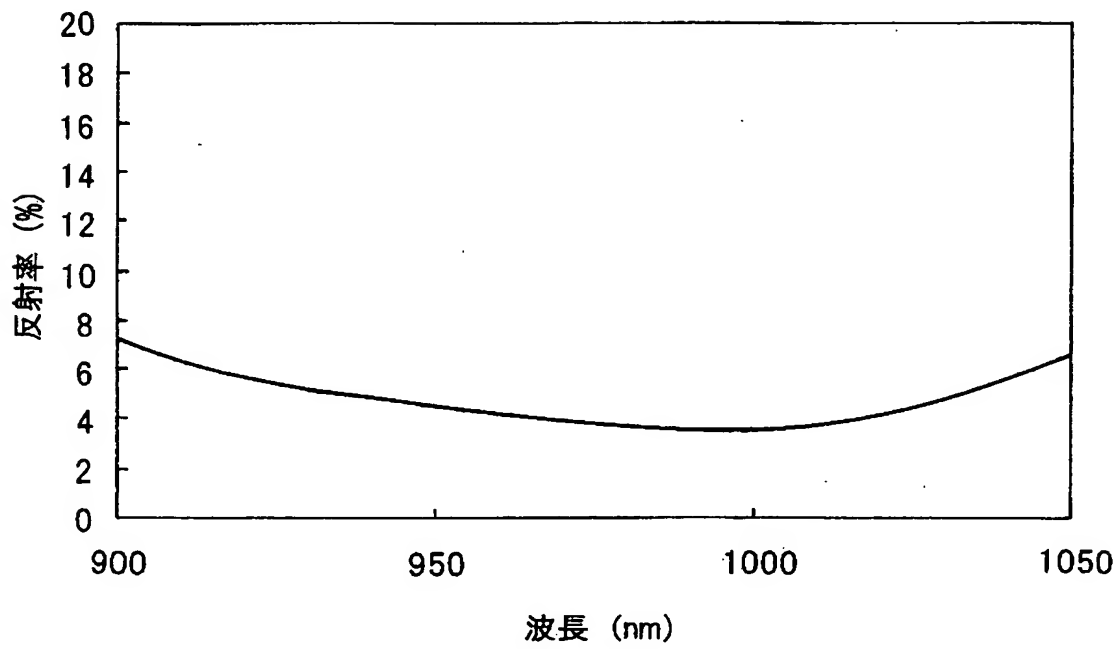
【図 4 6】



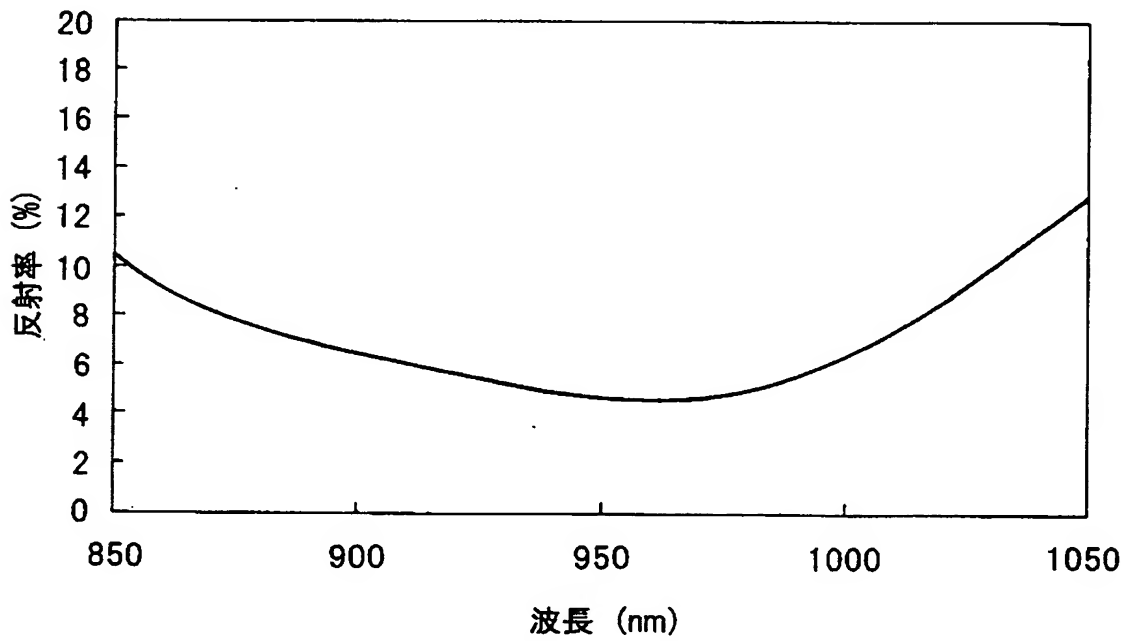
【図 4 7】



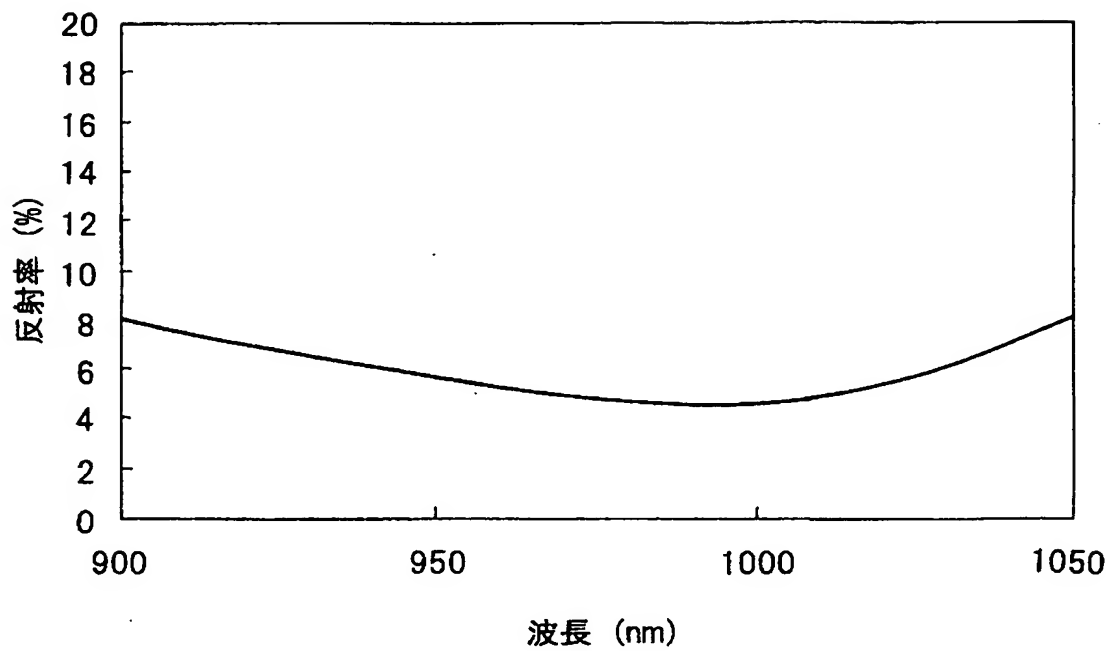
【図 4 8】



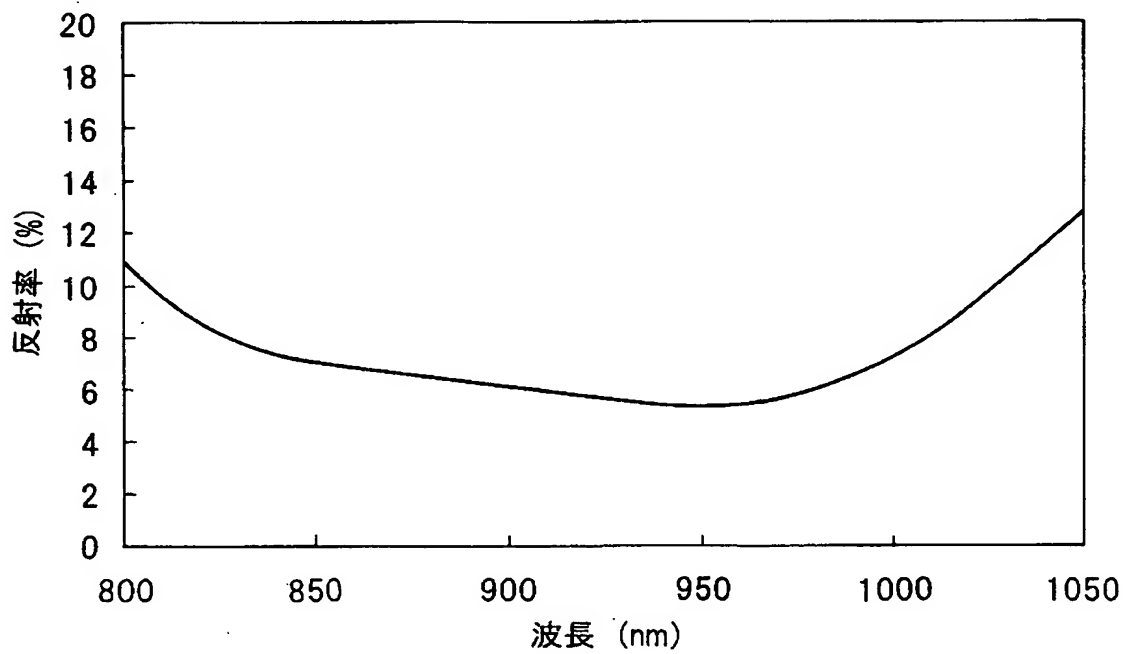
【図 4 9】



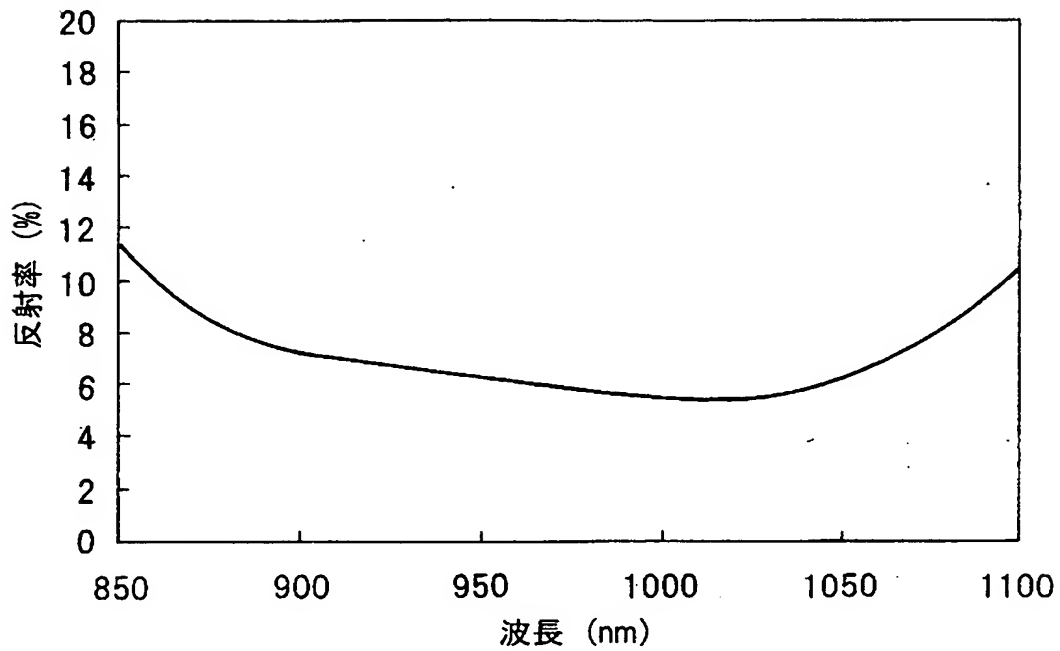
【図 50】



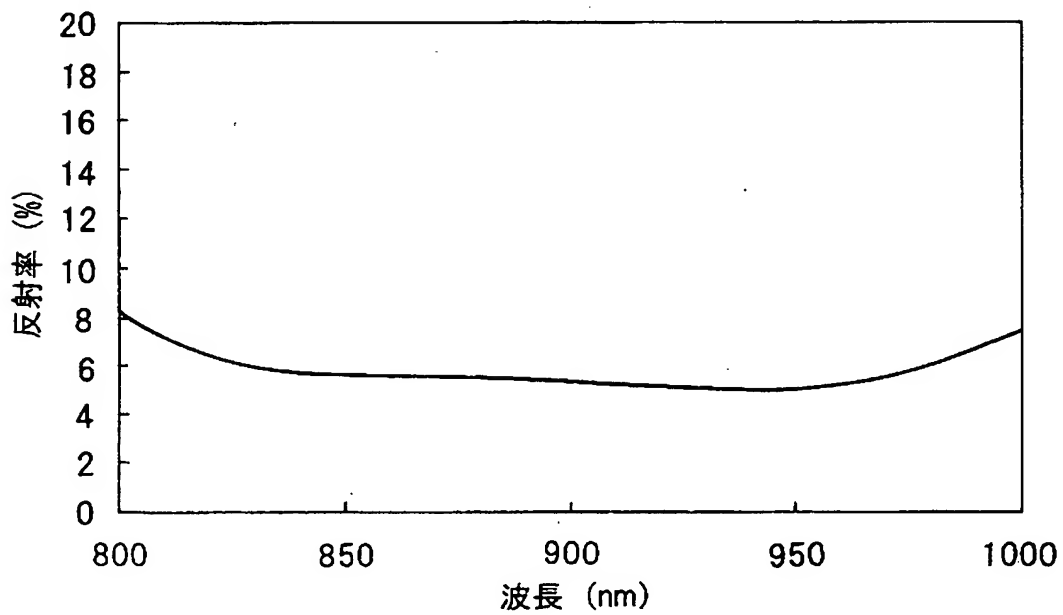
【図 51】



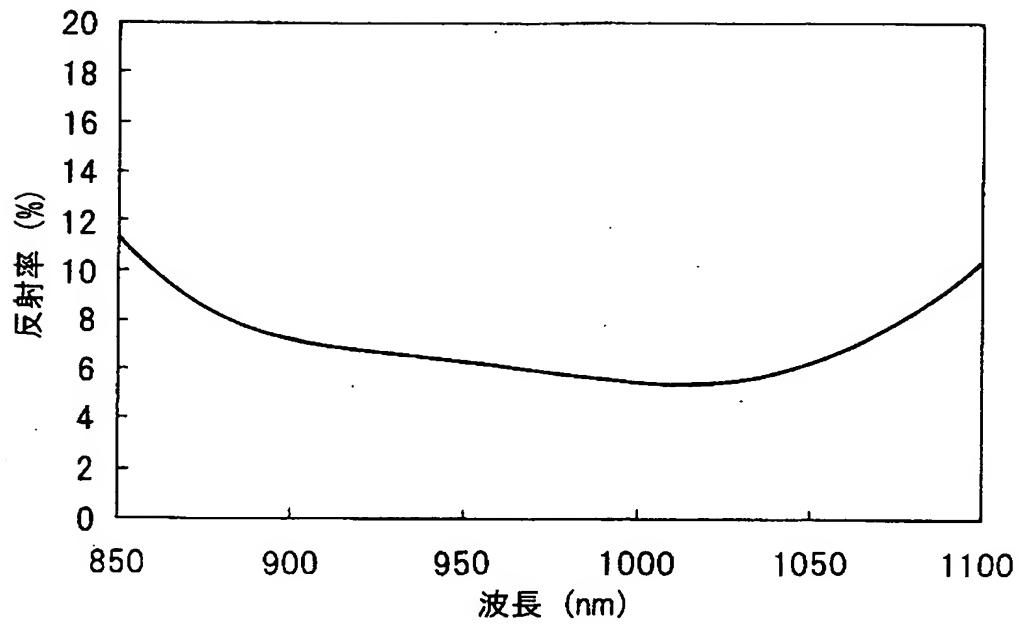
【図 5 2】



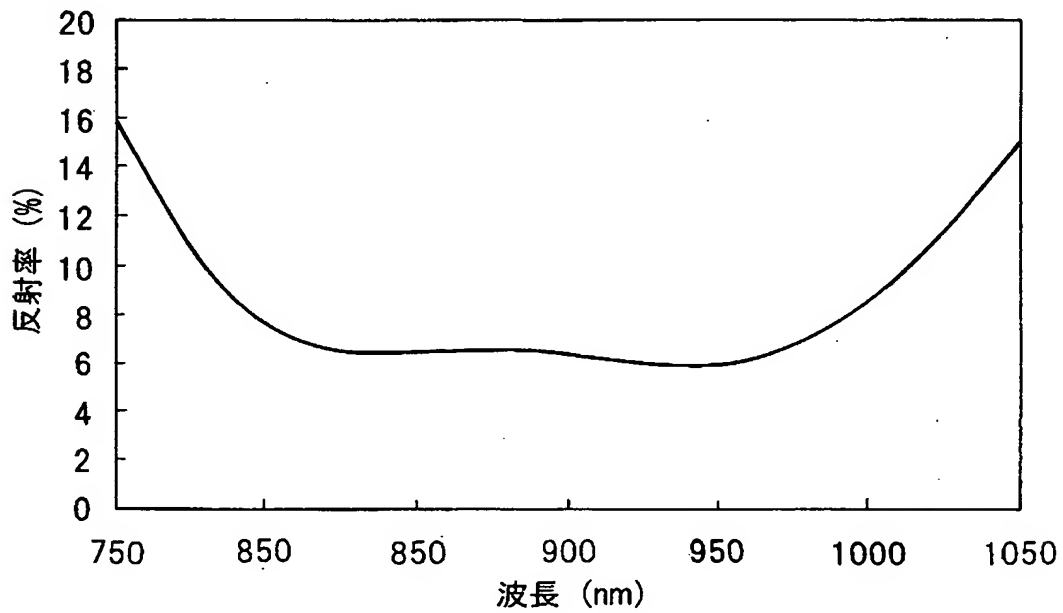
【図 5 3】



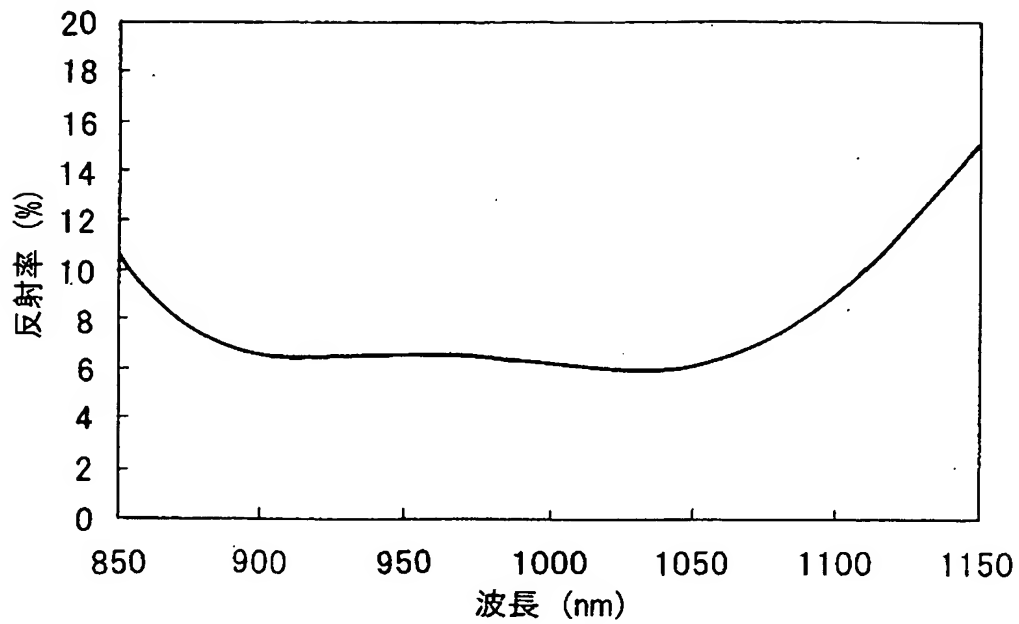
【図 5 4】



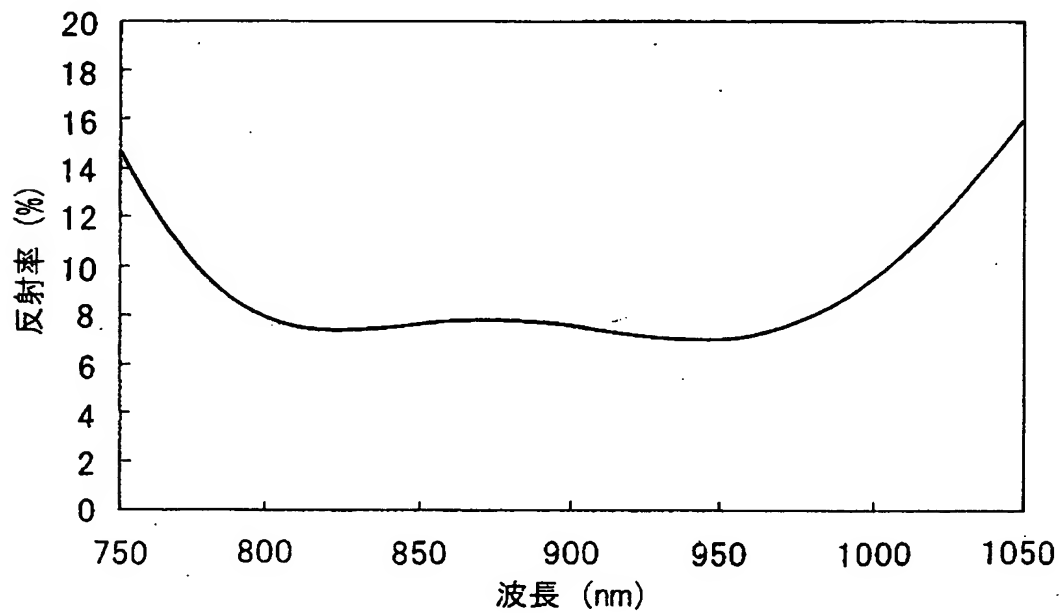
【図 5 5】



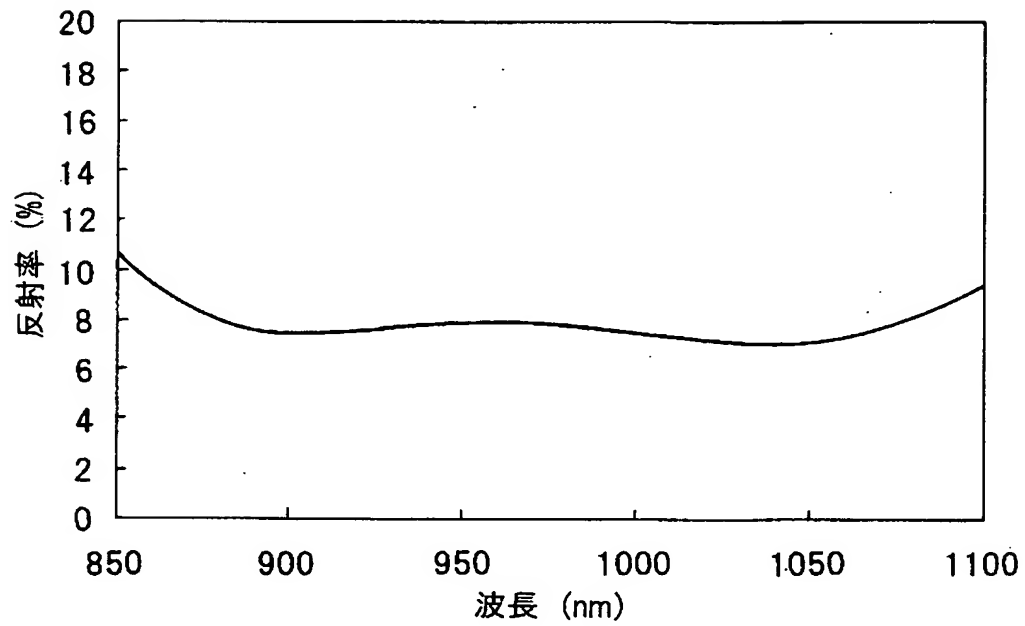
【図 5 6】



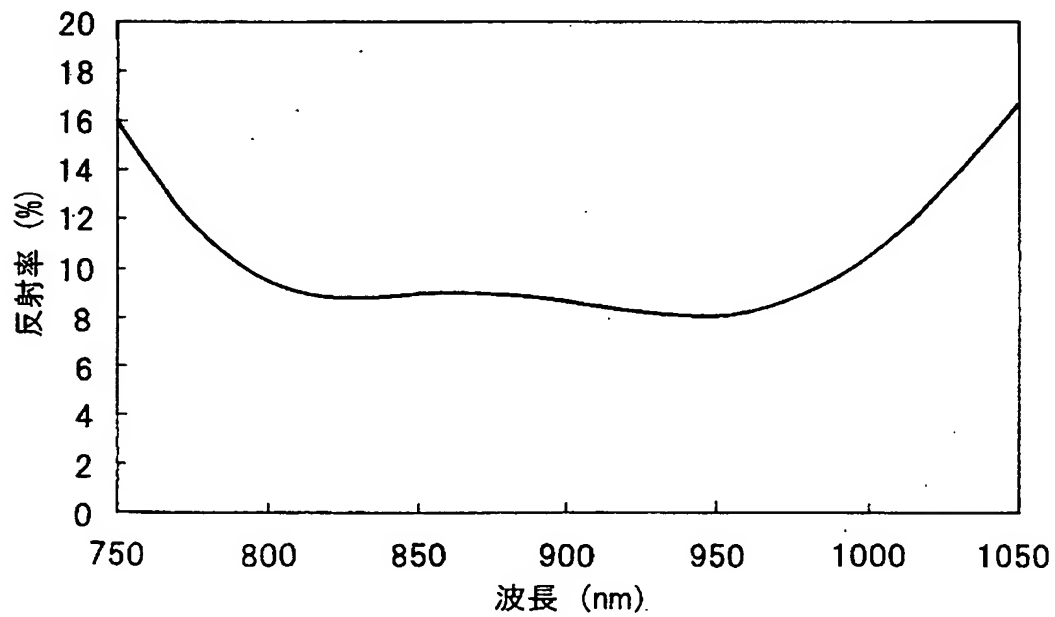
【図 5 7】



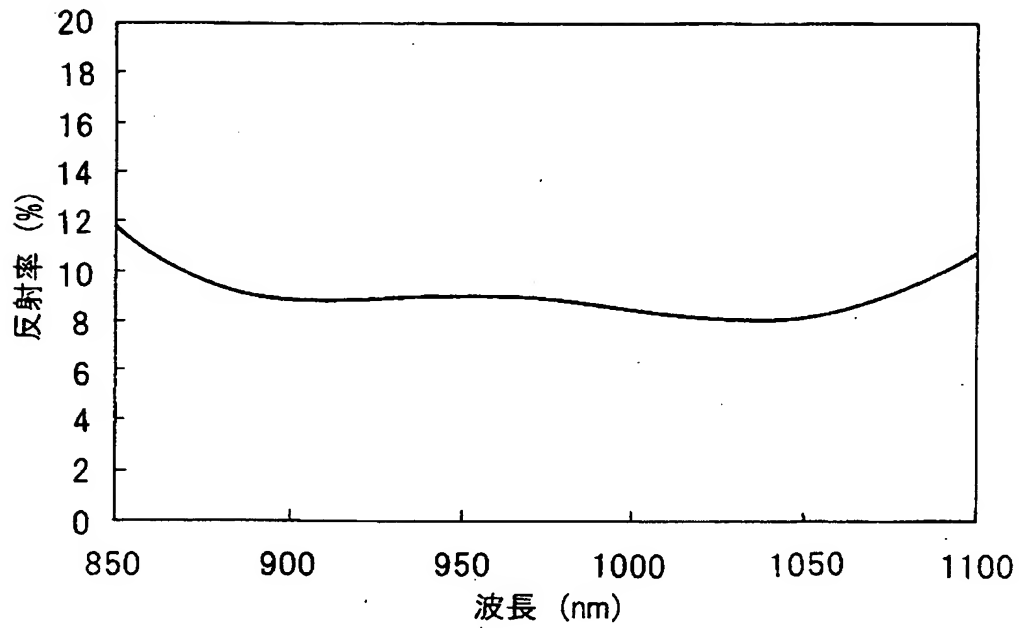
【図 5 8】



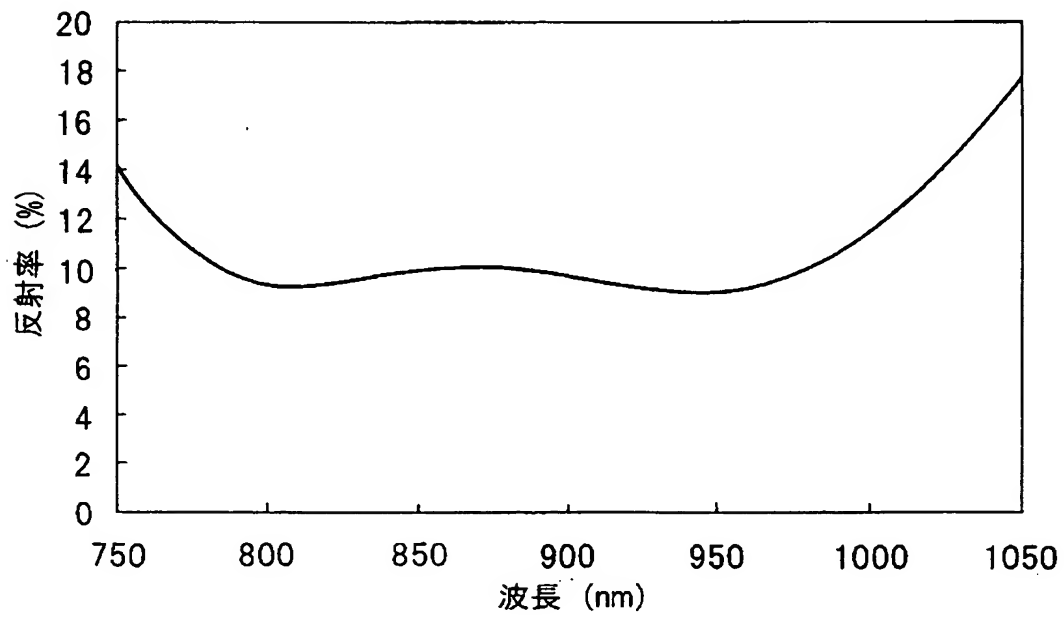
【図 5 9】



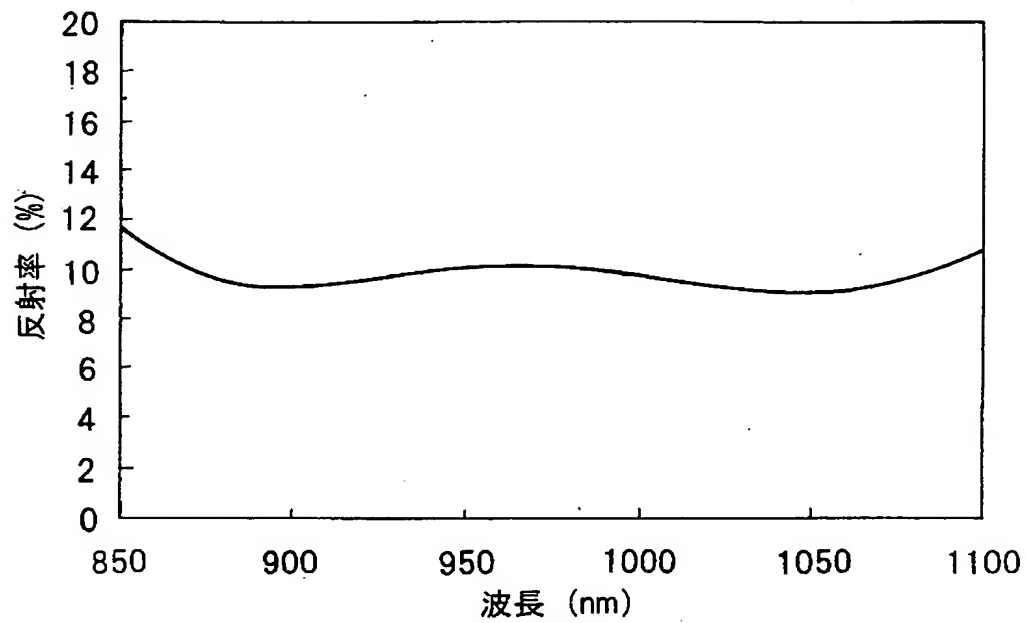
【図 60】



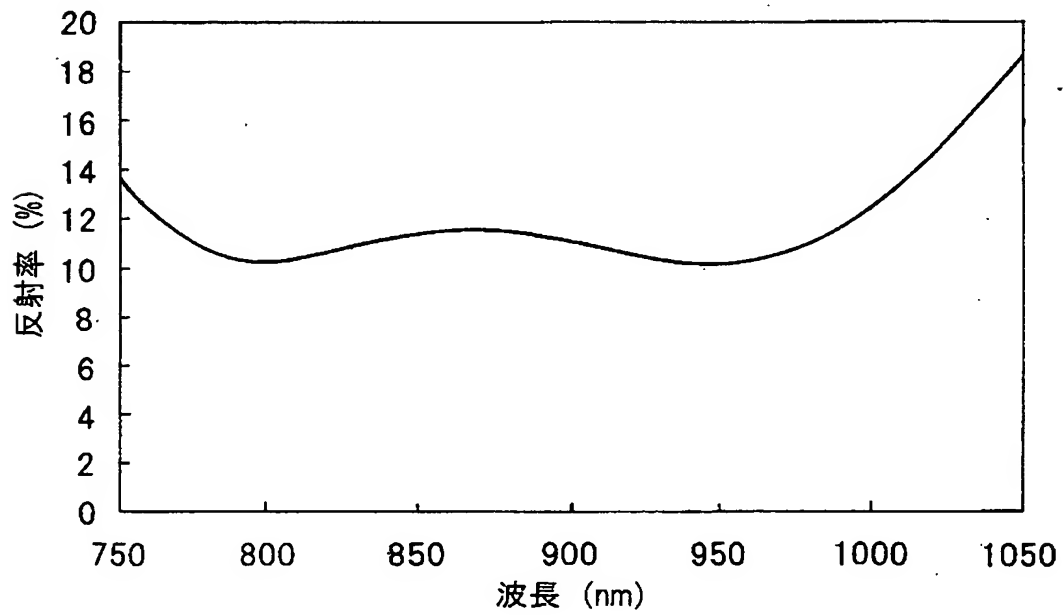
【図 61】



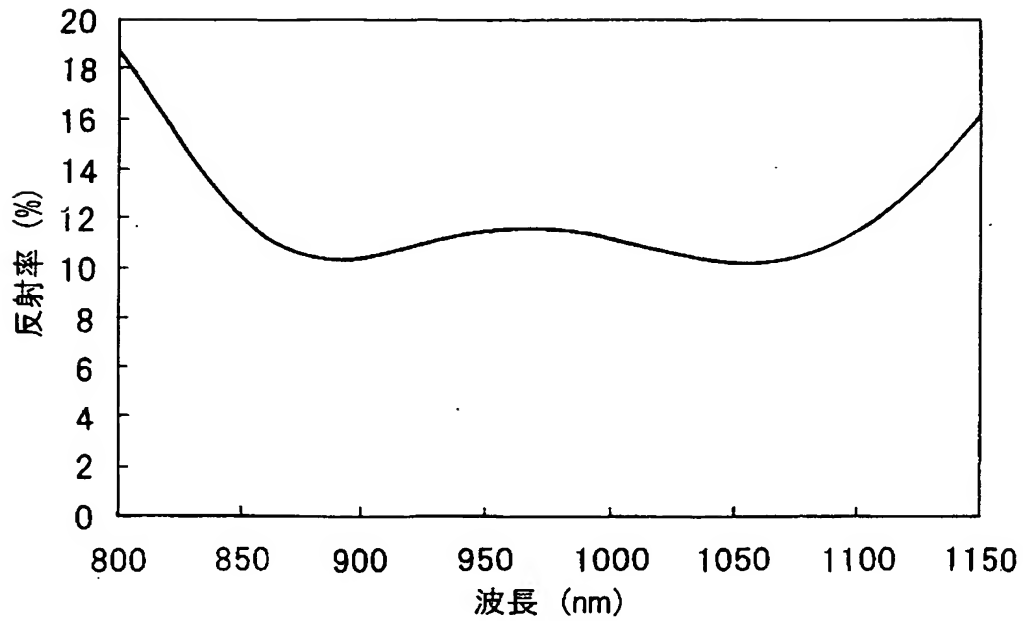
【図 6 2】



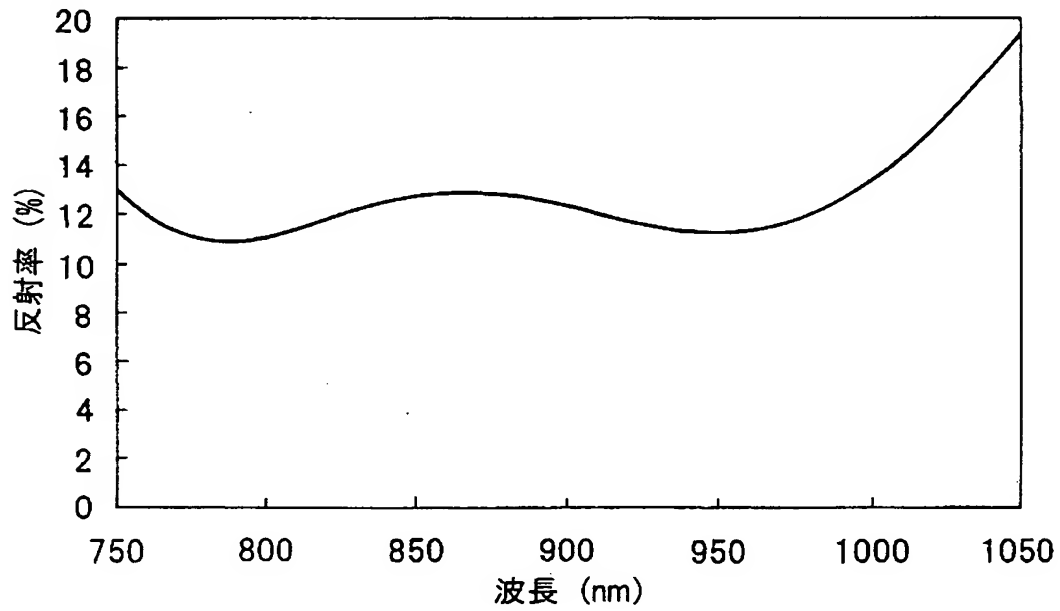
【図 6 3】



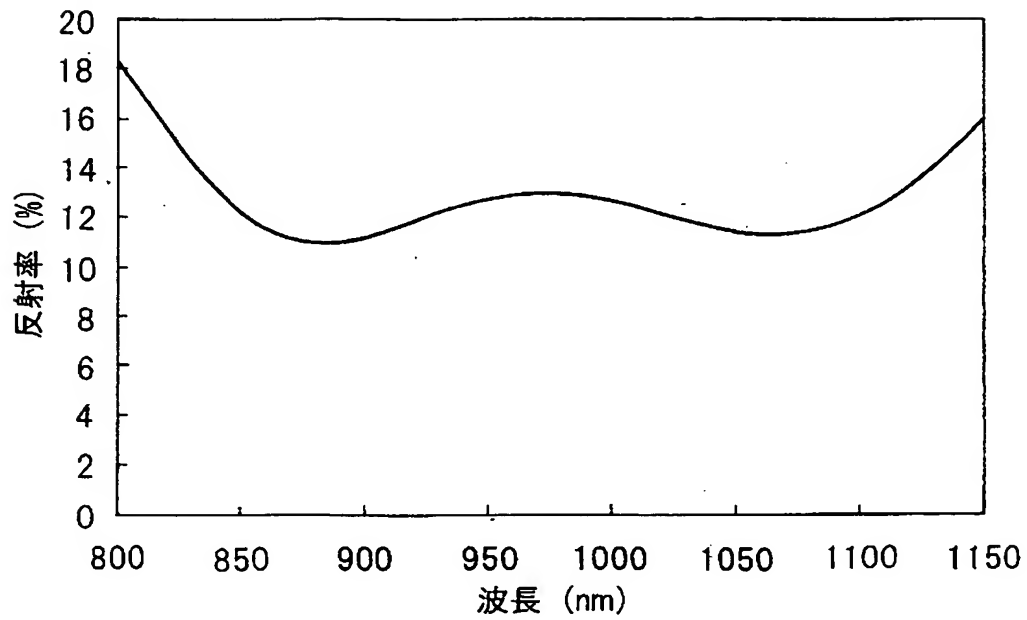
【図 6 4】



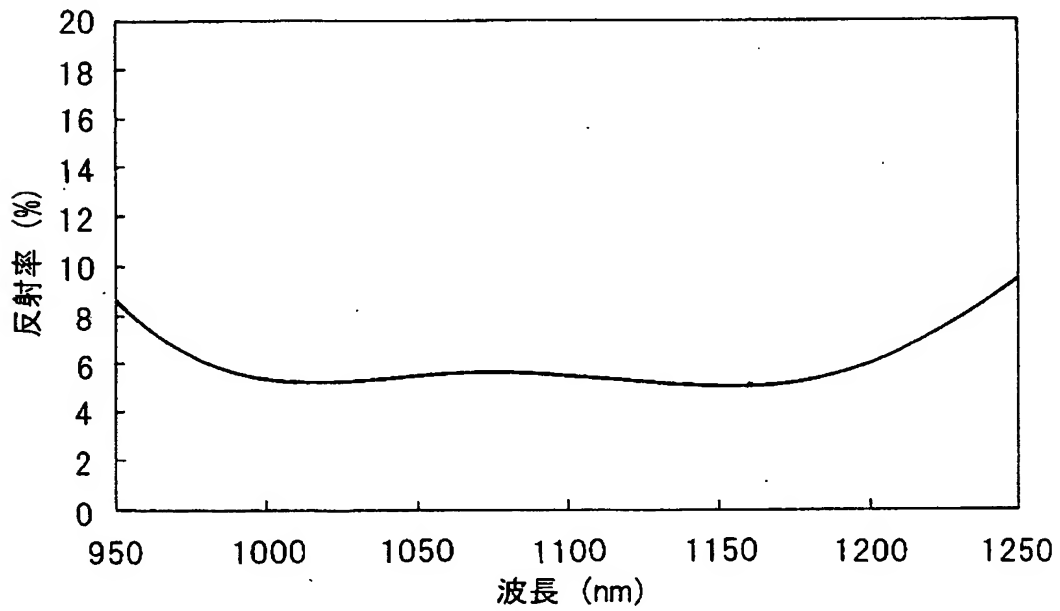
【図 6 5】



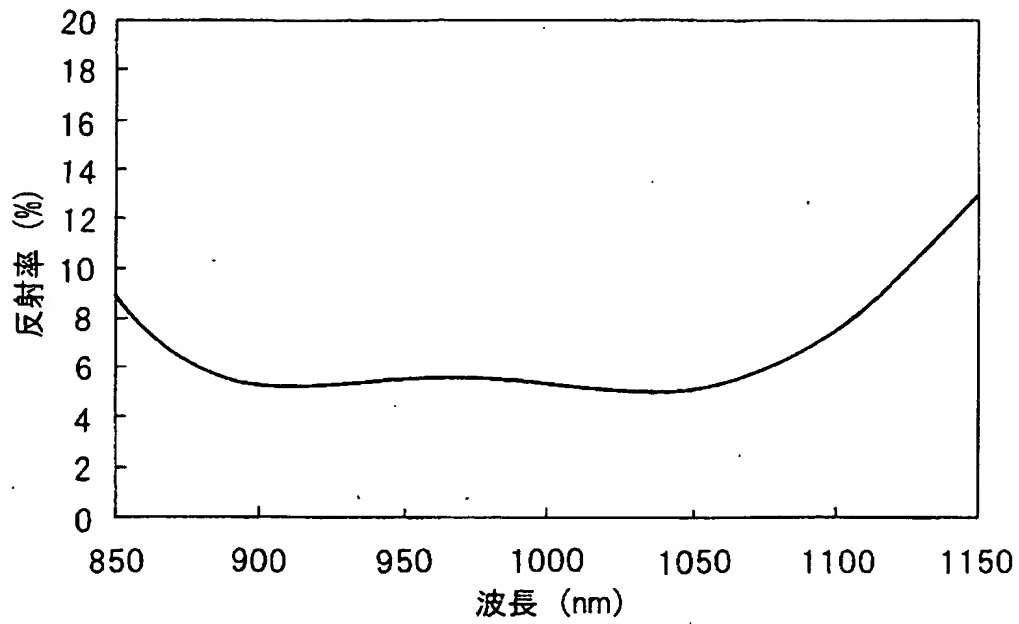
【図 6 6】



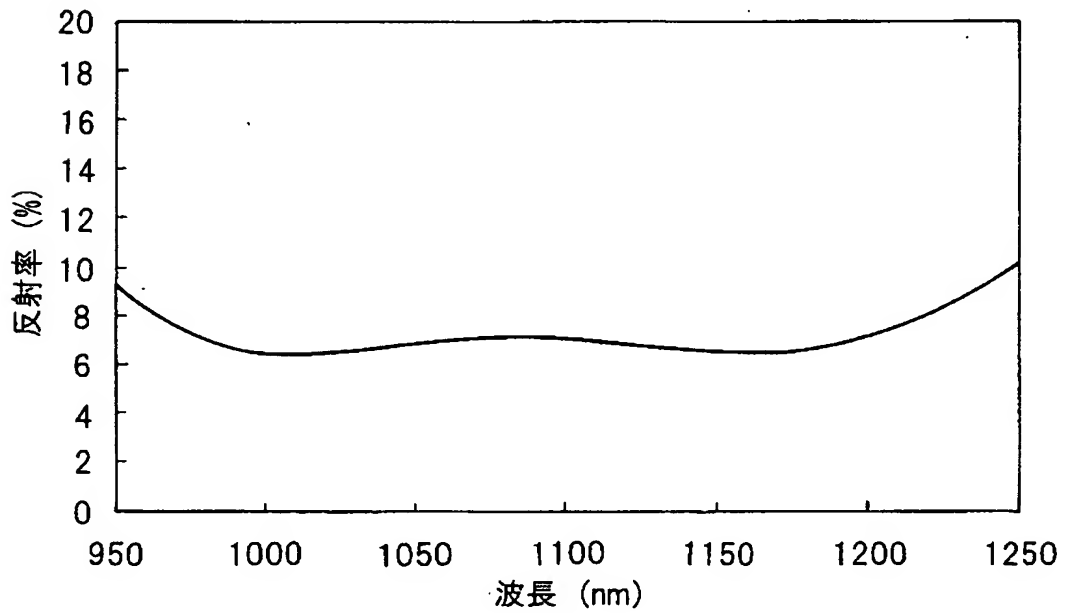
【図 6 7】



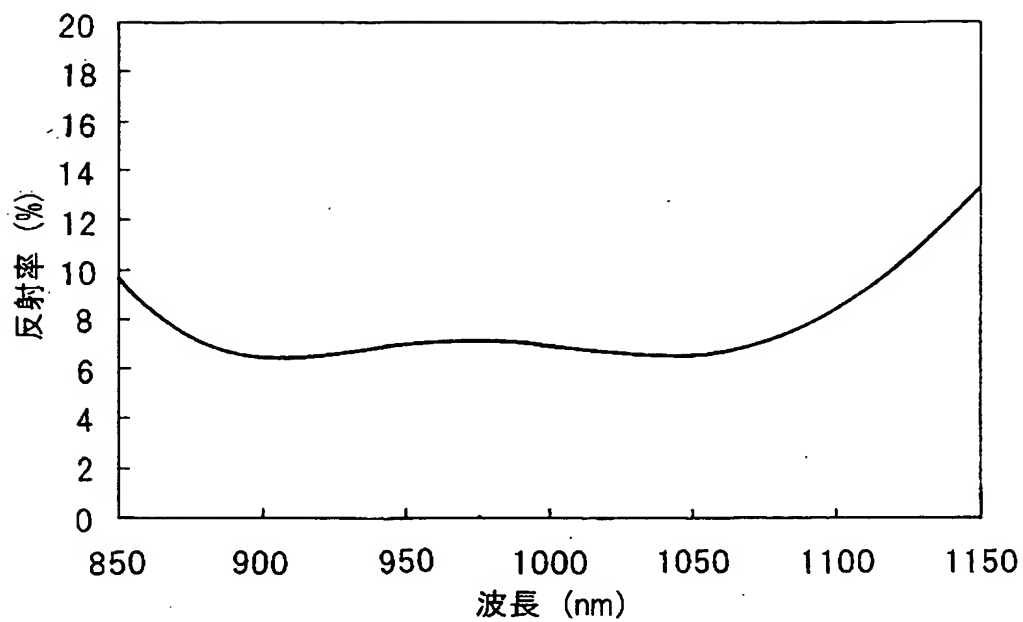
【図 6 8】



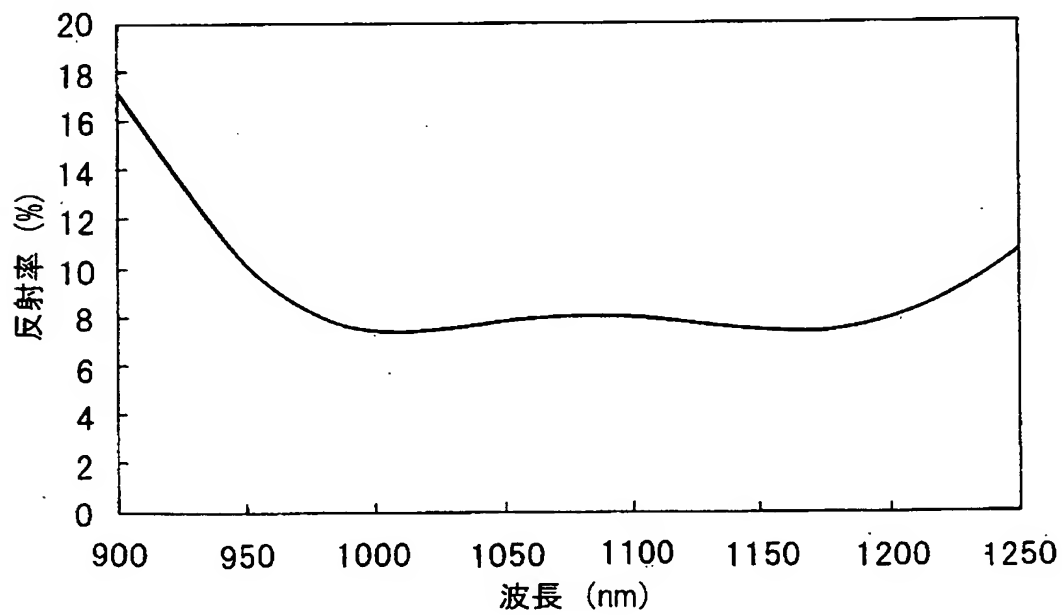
【図 6 9】



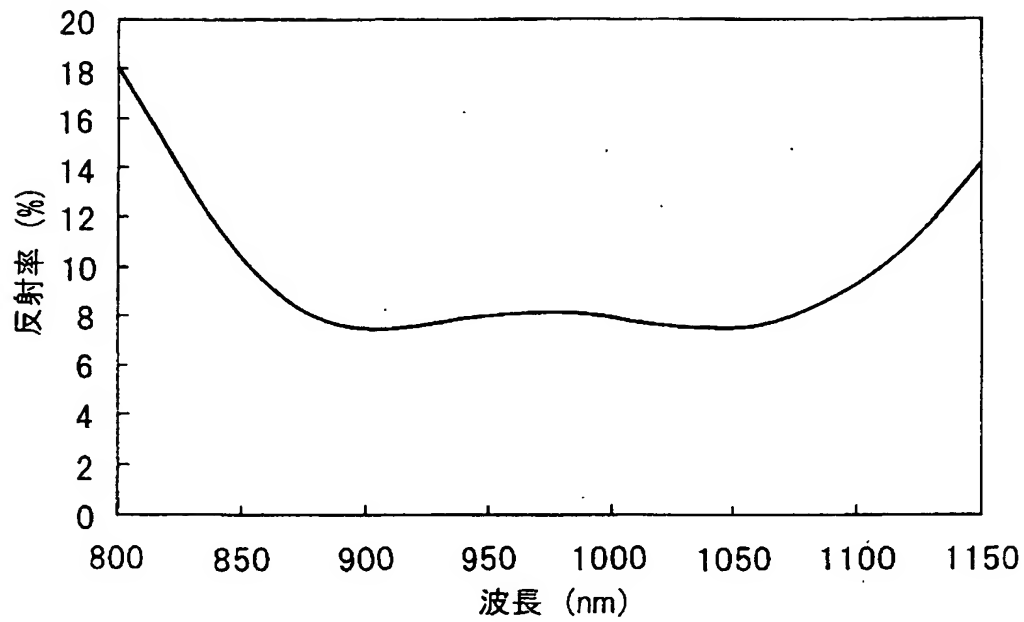
【図 7 0】



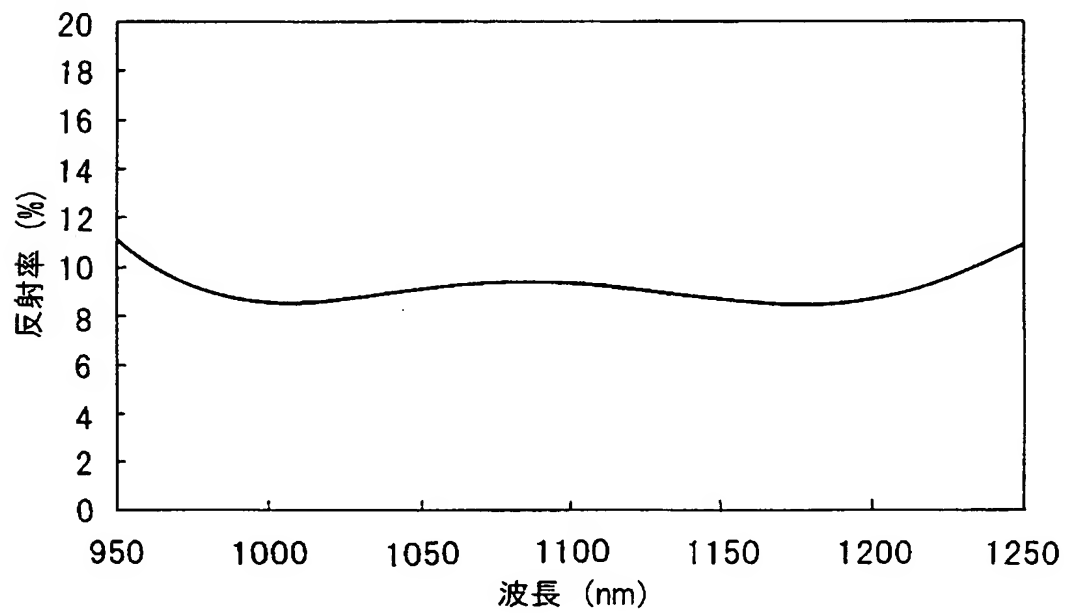
【図 7 1】



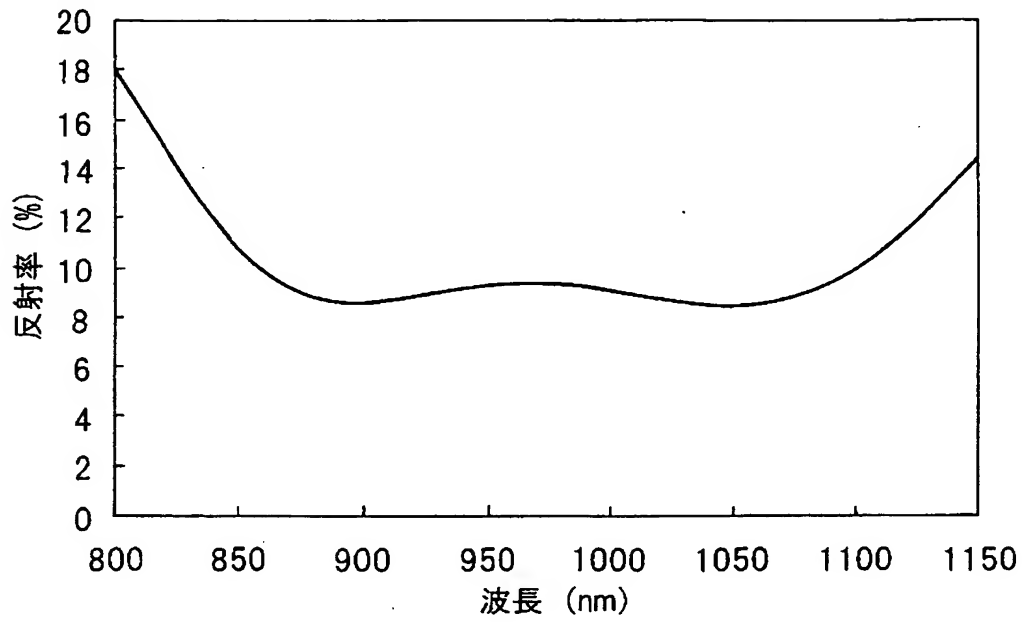
【図 7 2】



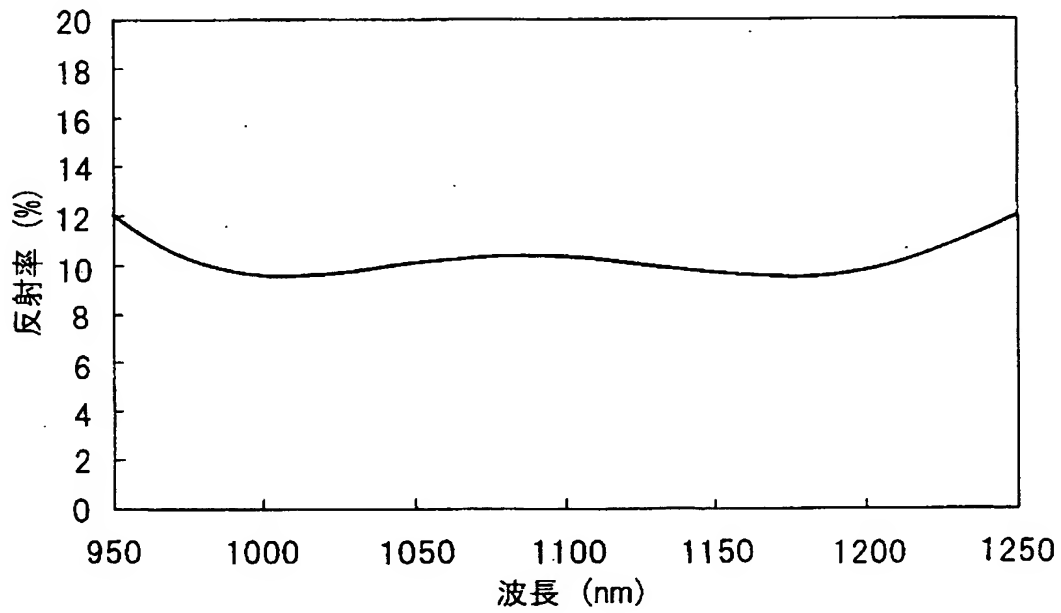
【図 7 3】



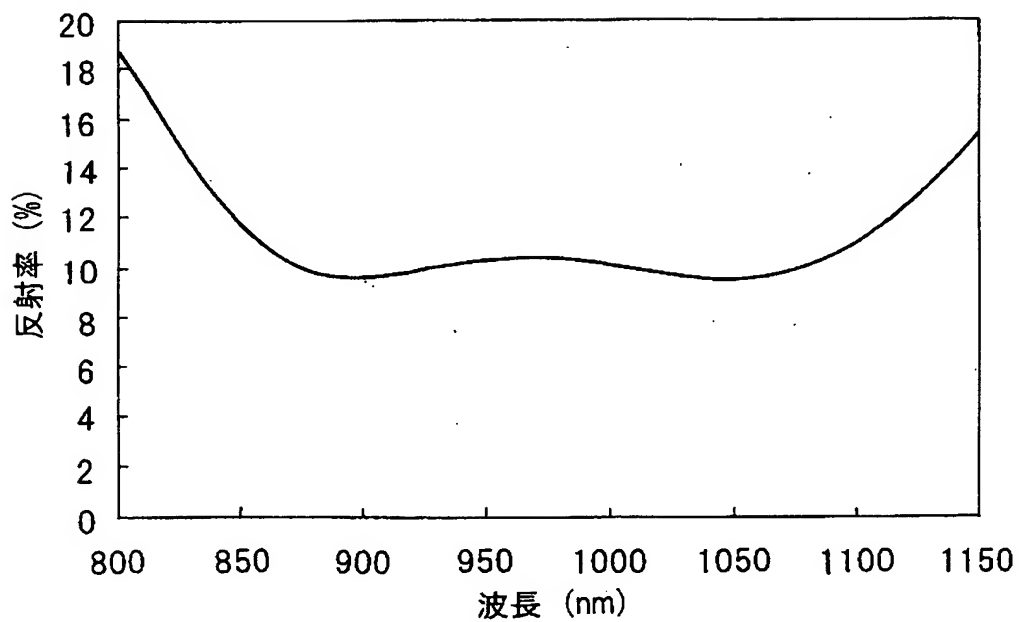
【図 7 4】



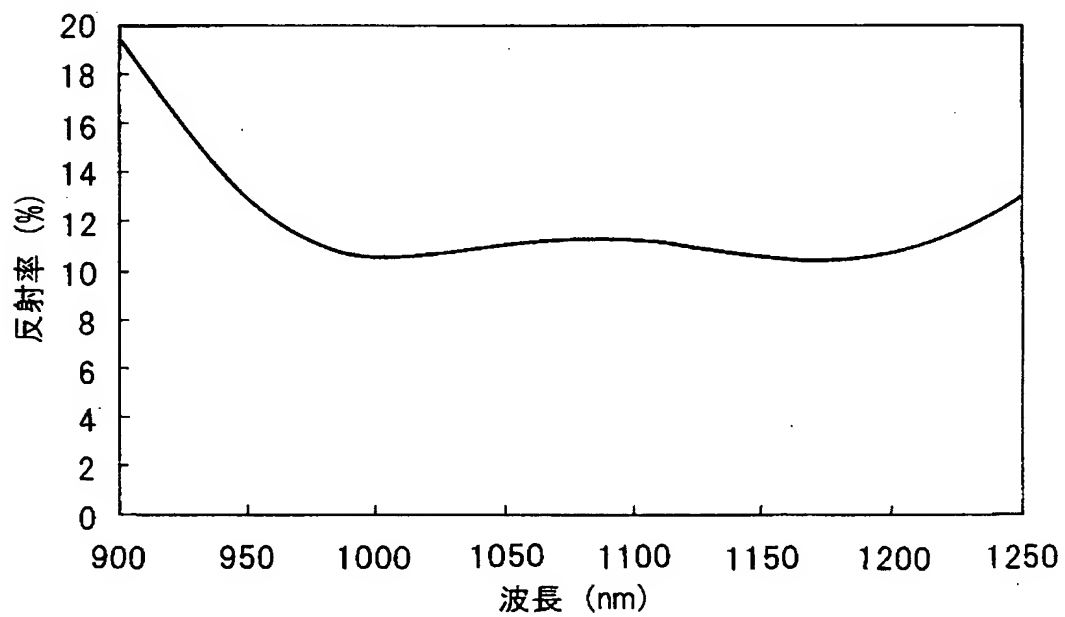
【図 7 5】



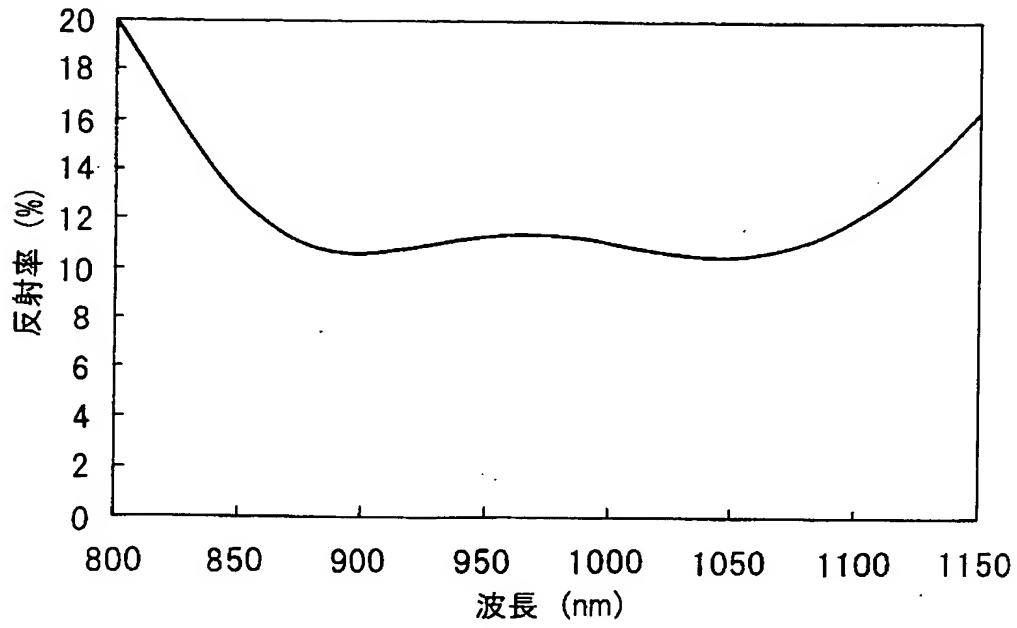
【図 7 6】



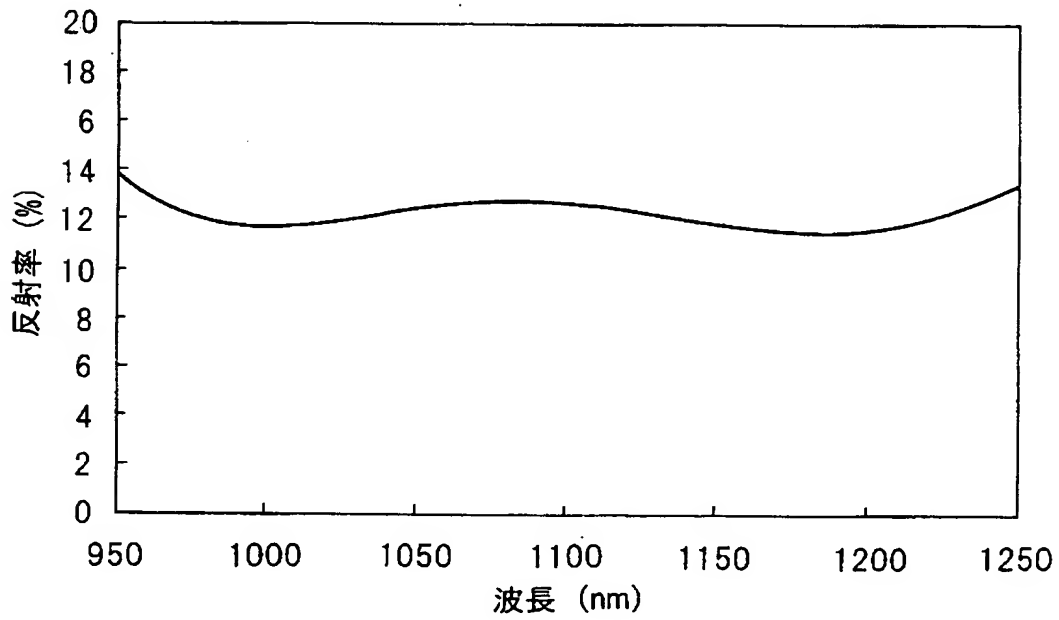
【図 7 7】



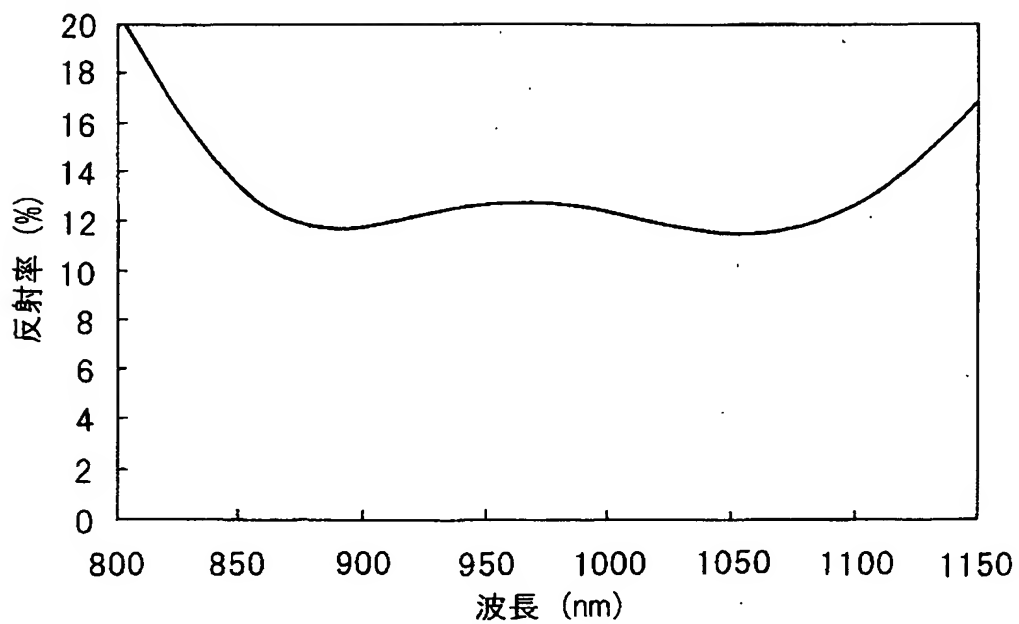
【図 7 8】



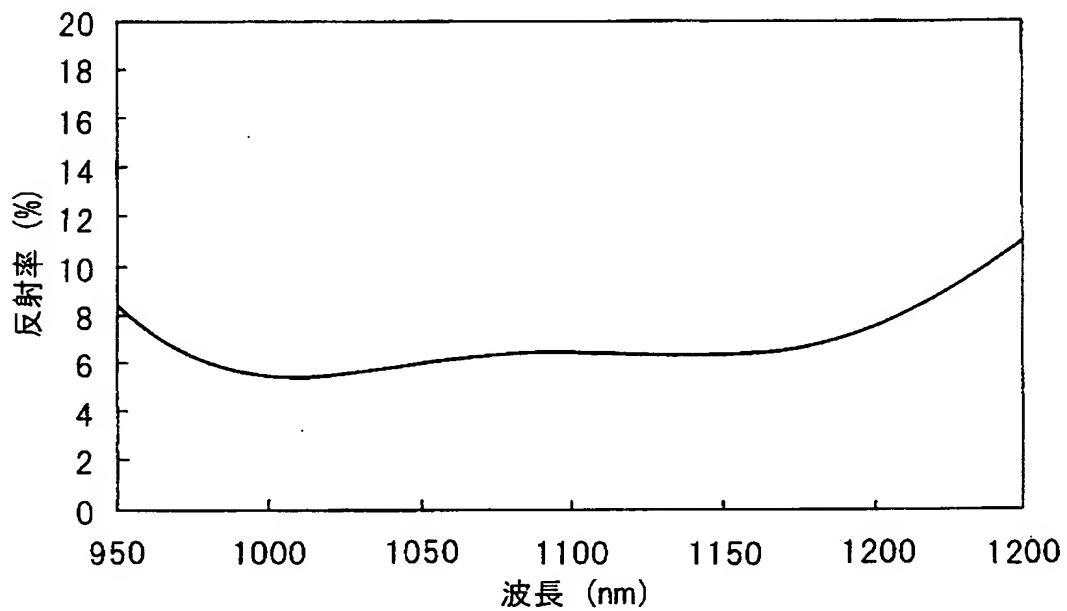
【図 7 9】



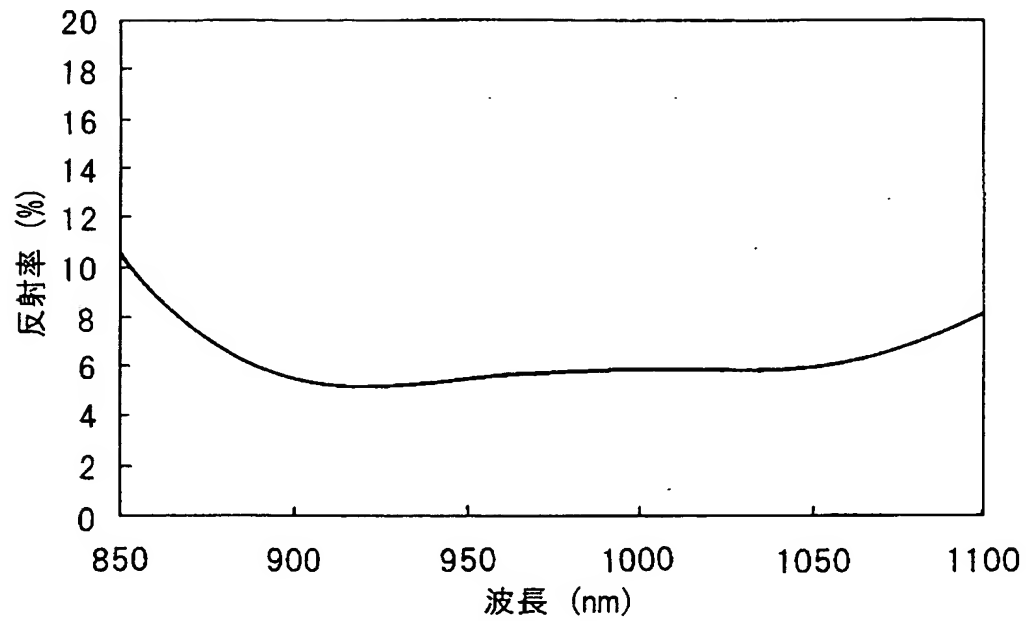
【図 8 0】



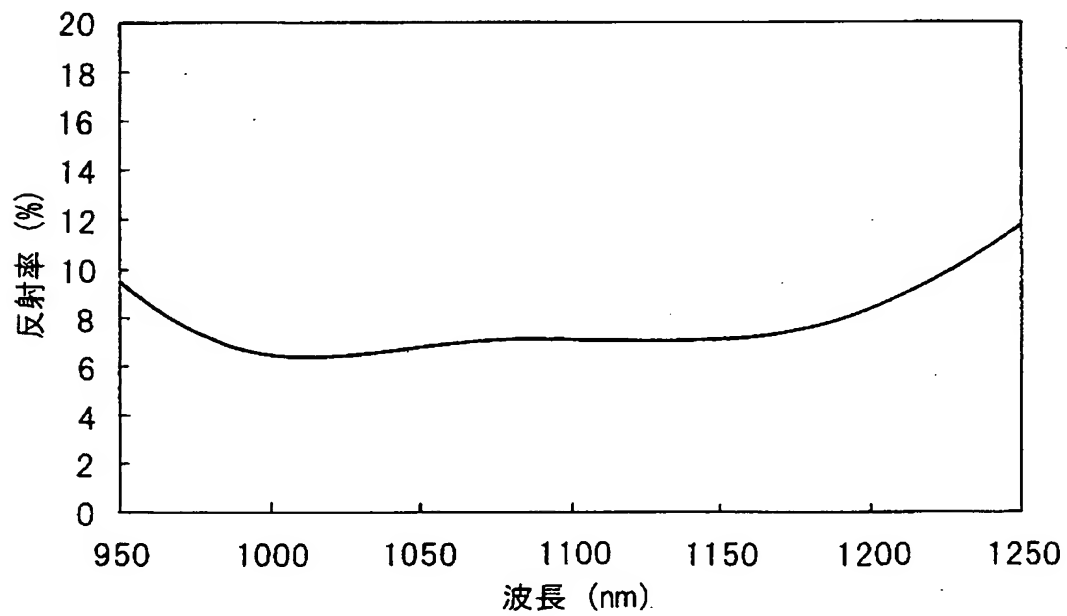
【図 8 1】



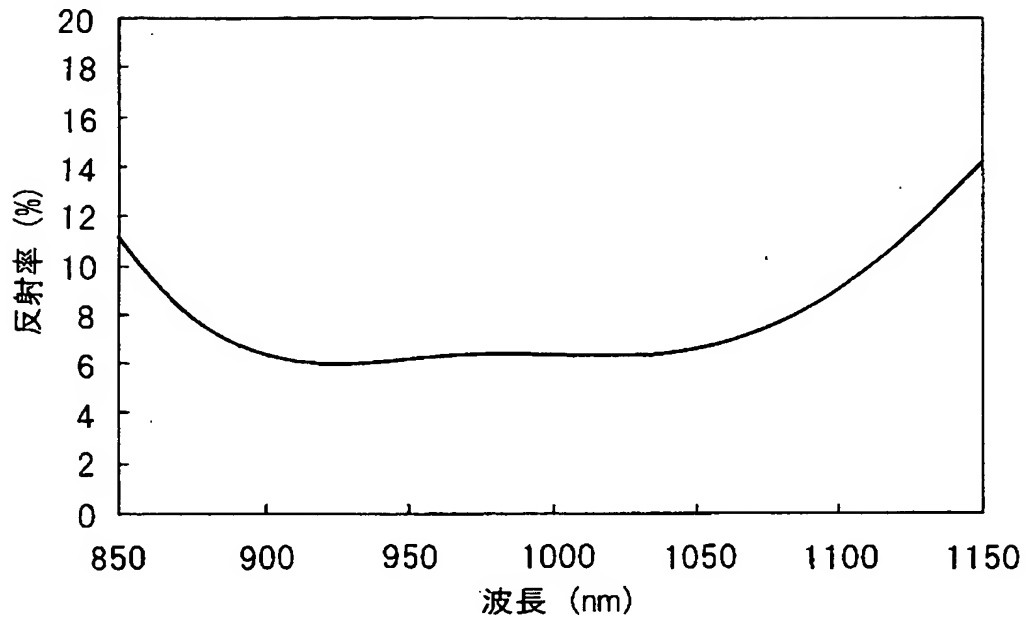
【図 8 2】



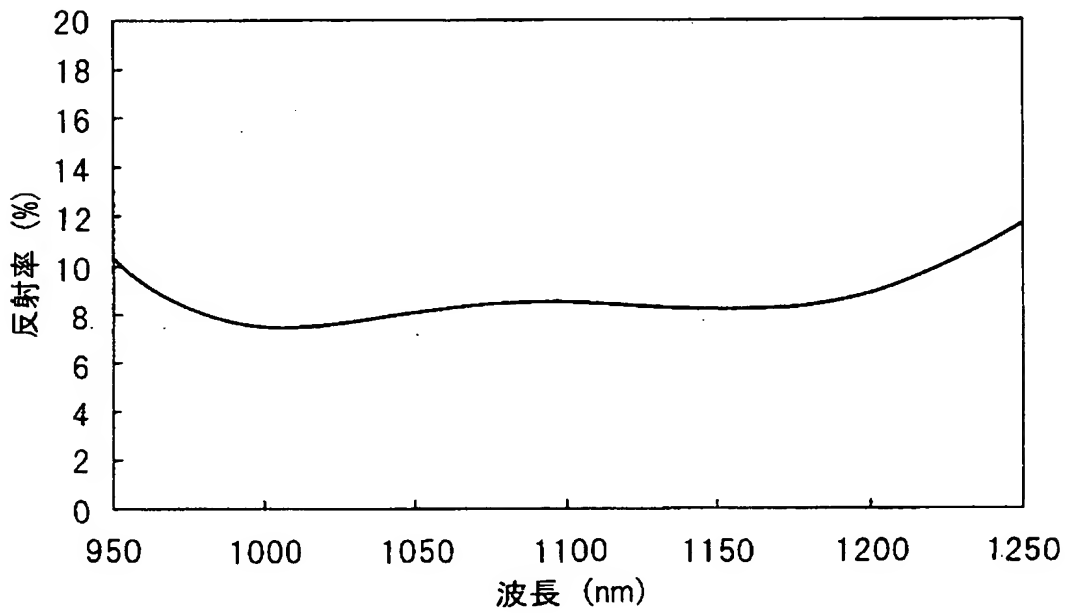
【図 8 3】



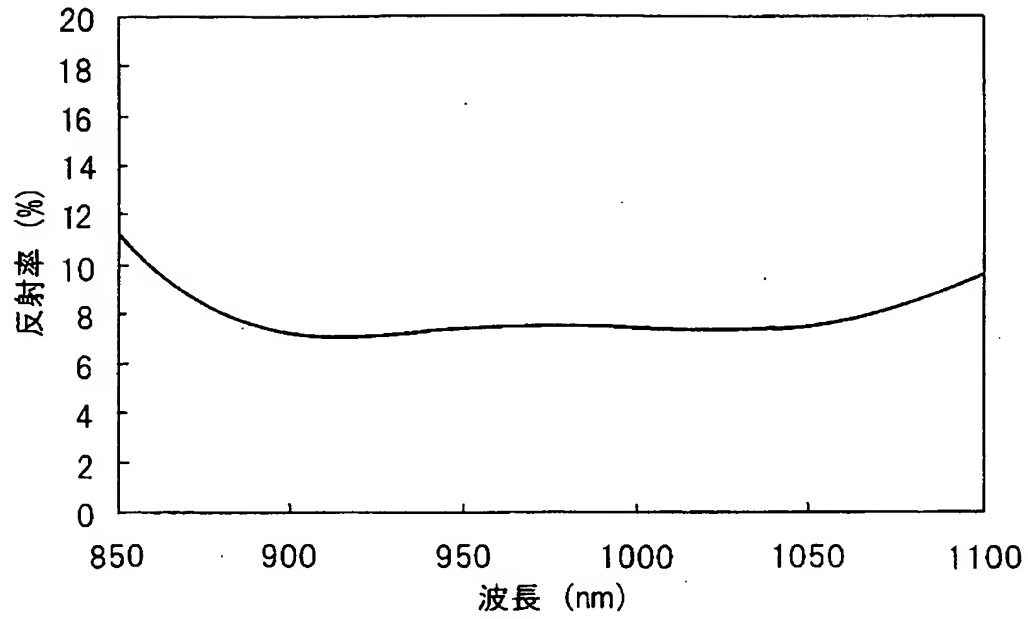
【図 8 4】



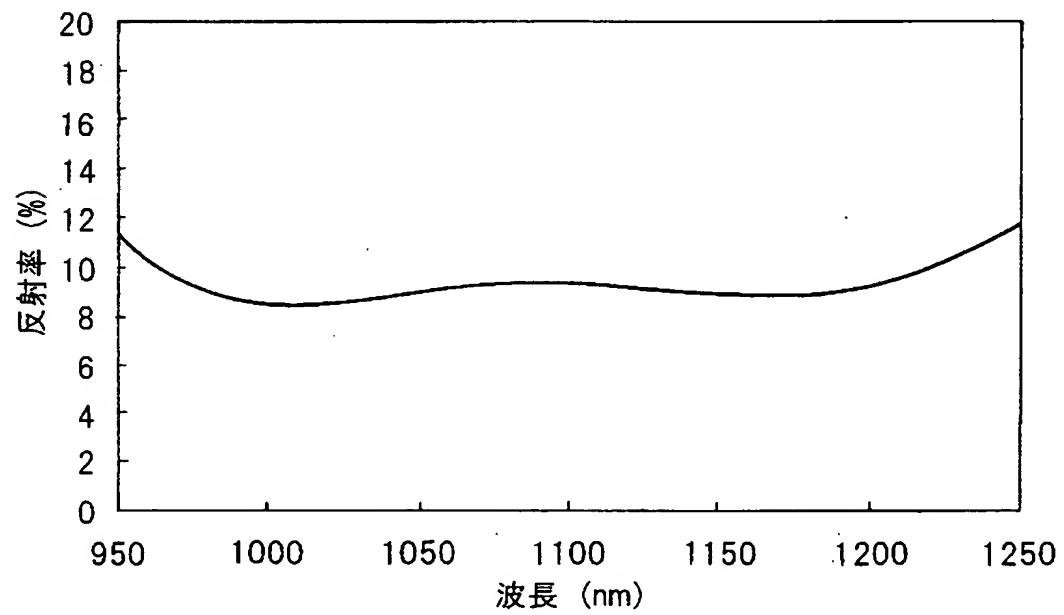
【図 8 5】



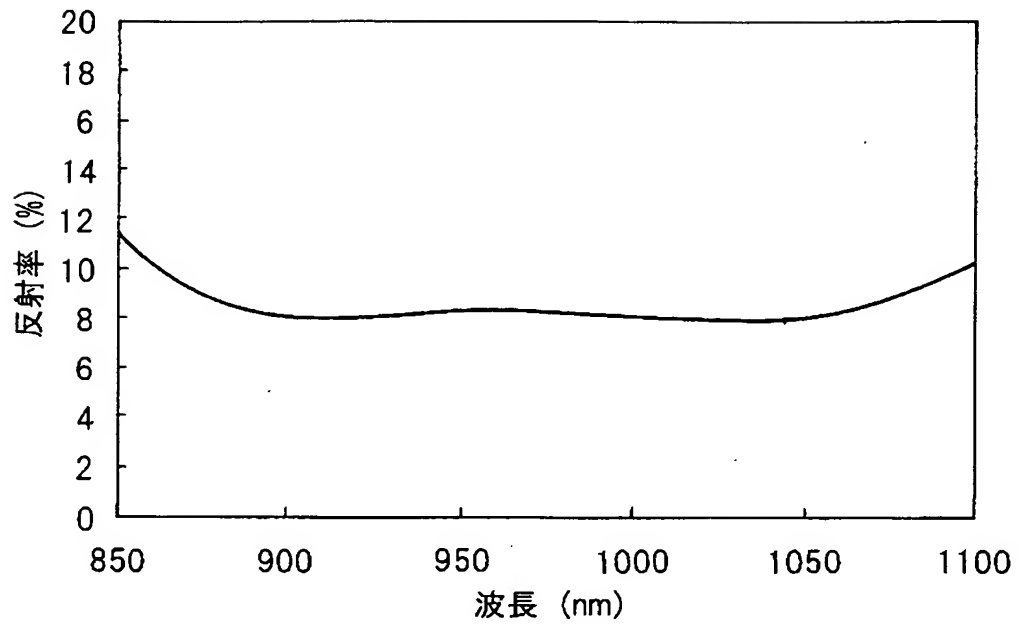
【図 8 6】



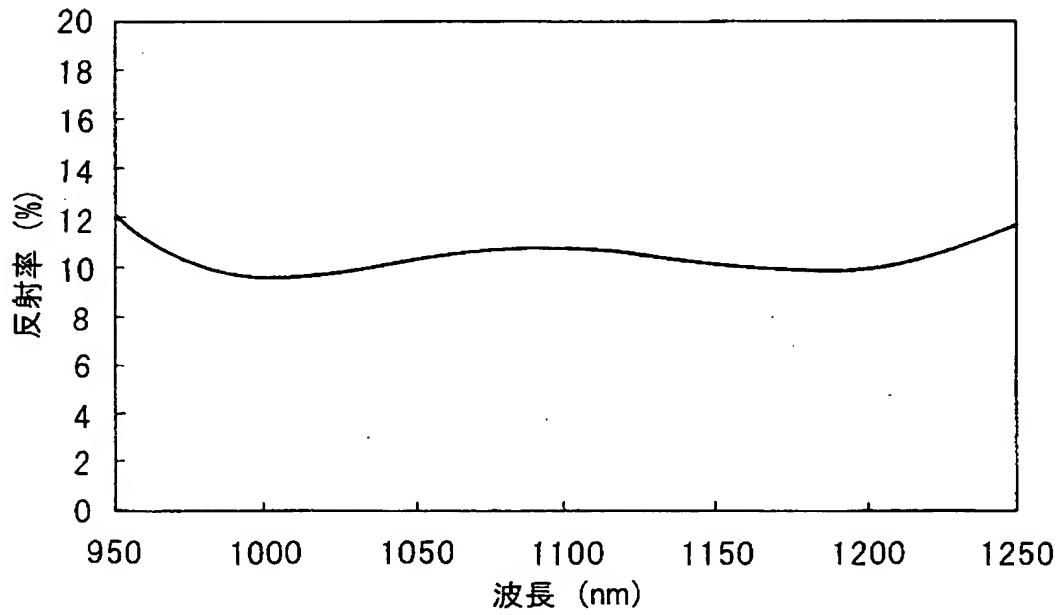
【図 8 7】



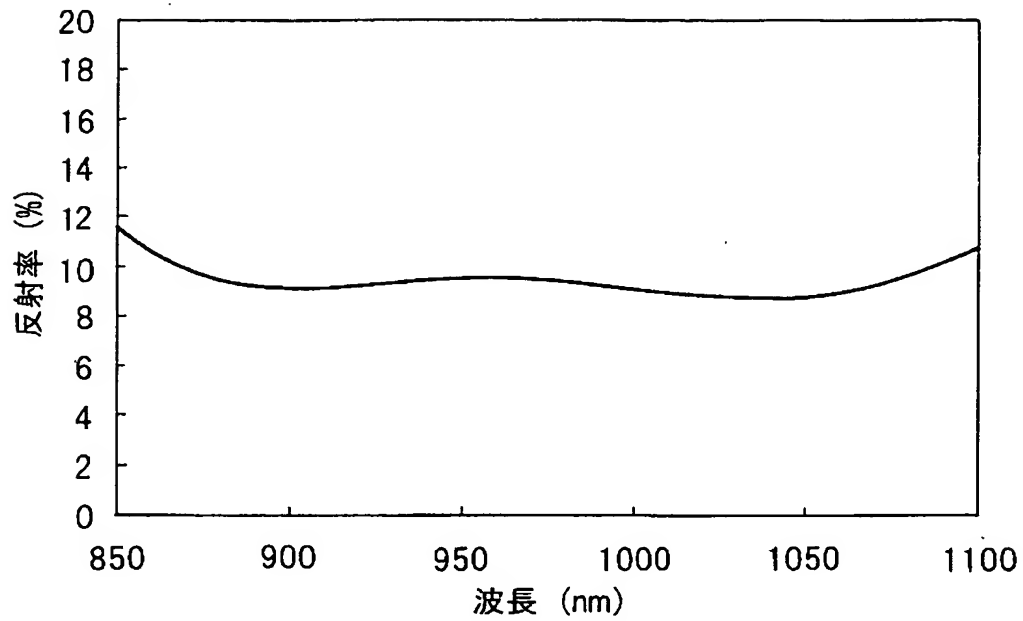
【図 88】



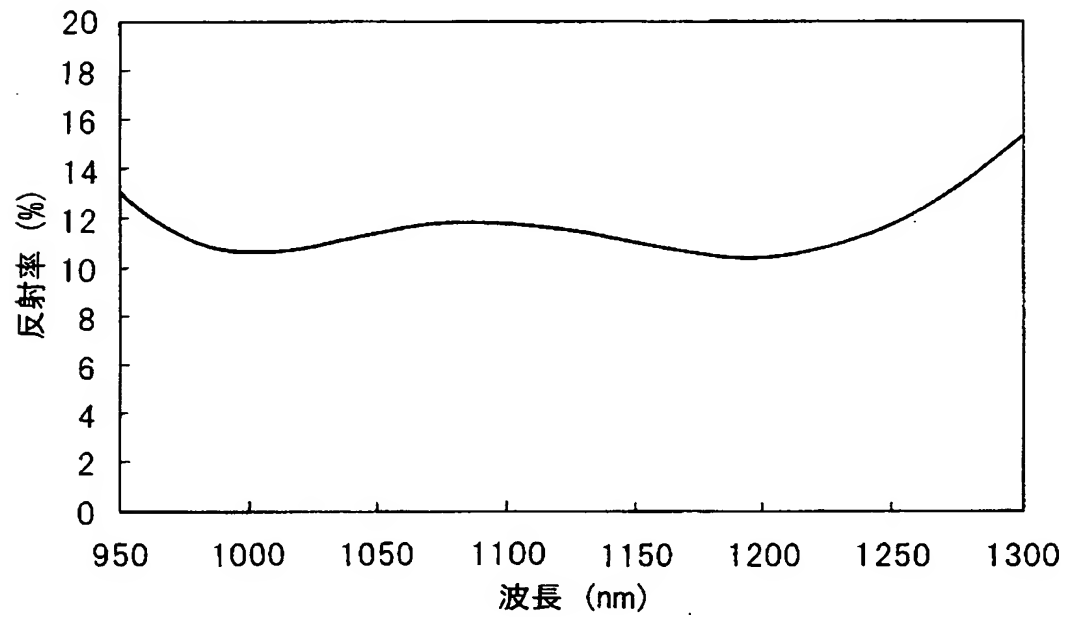
【図 89】



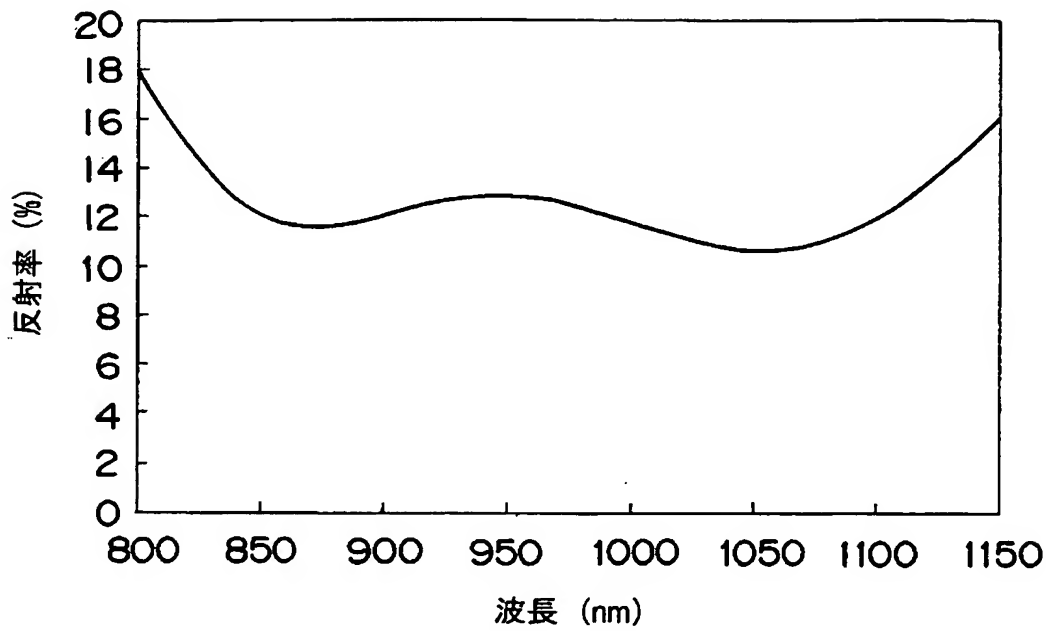
【図 90】



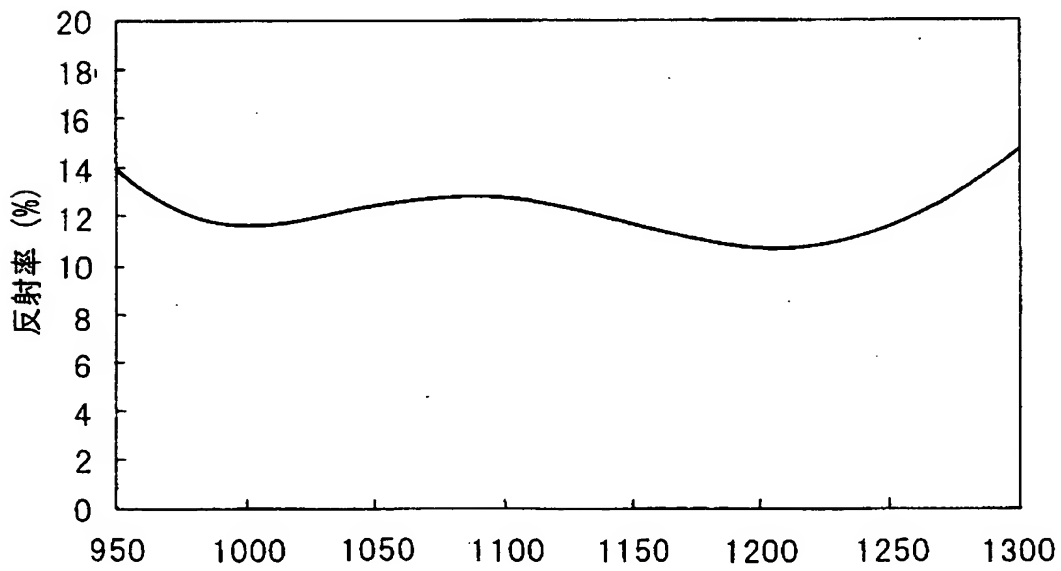
【図 91】



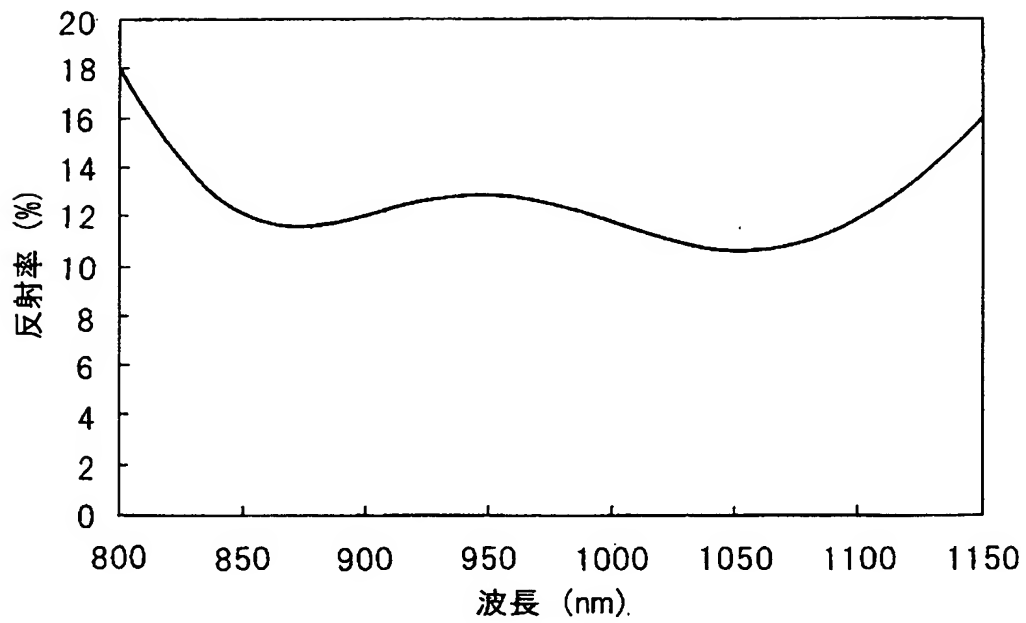
【図 9 2】



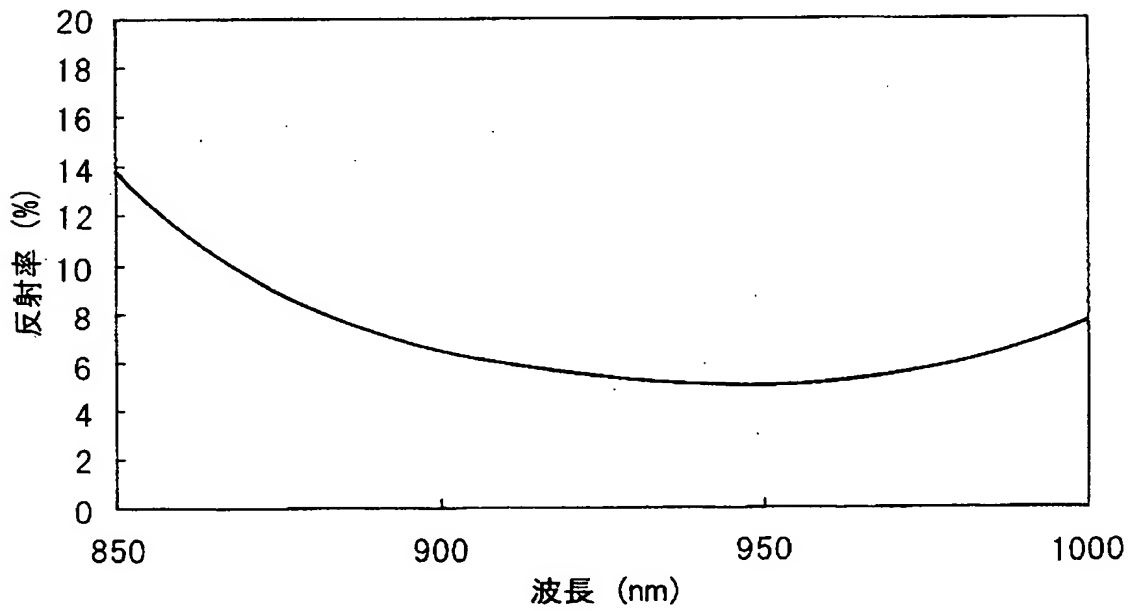
【図 9 3】



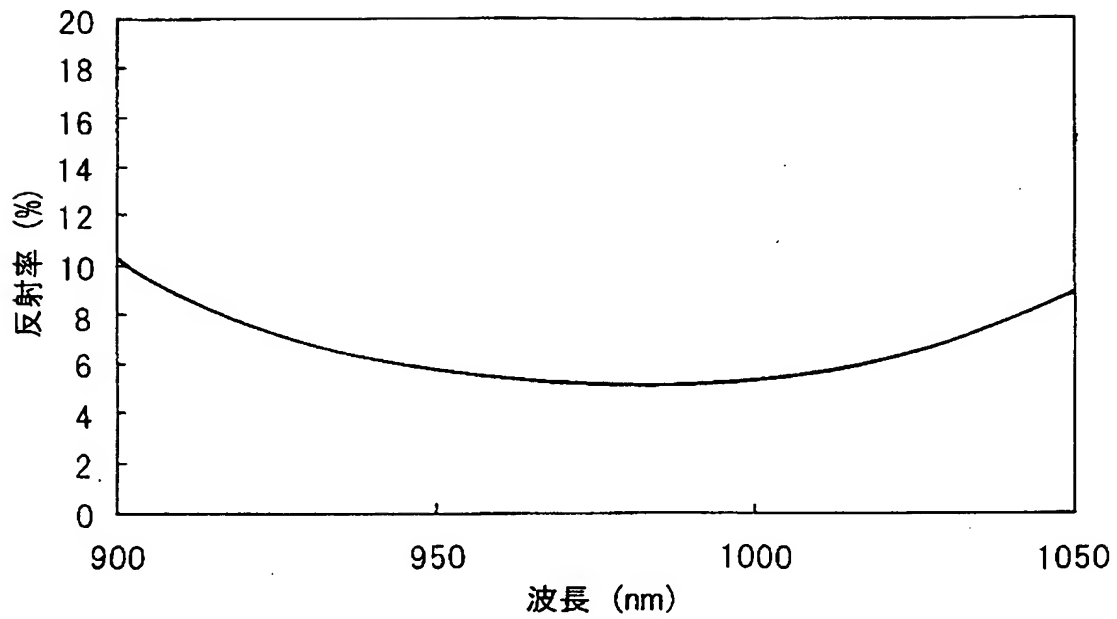
【図 9 4】



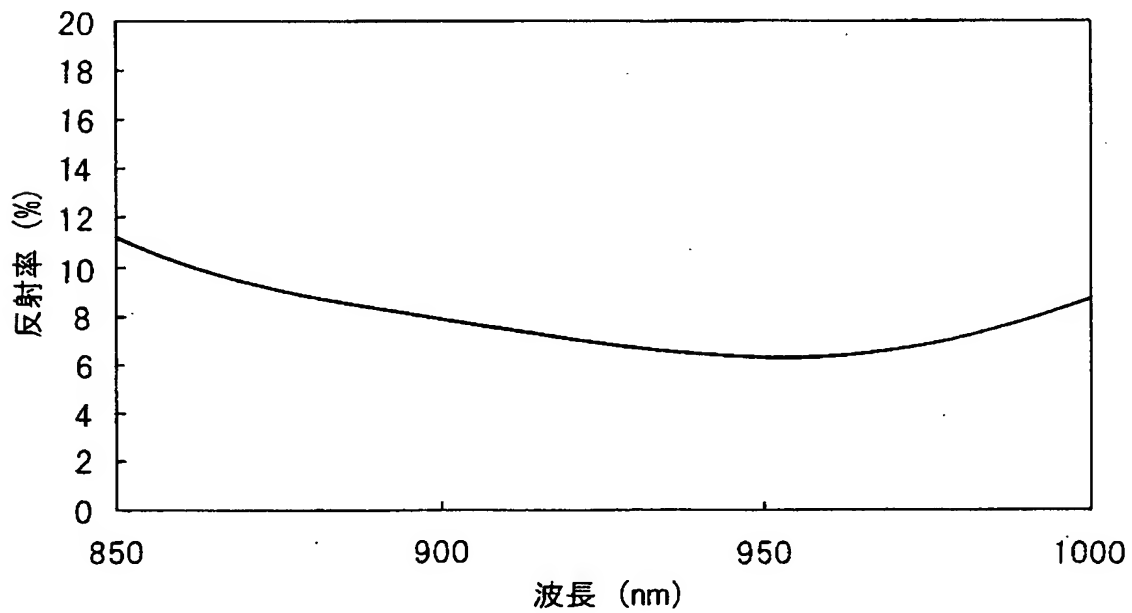
【図 9 5】



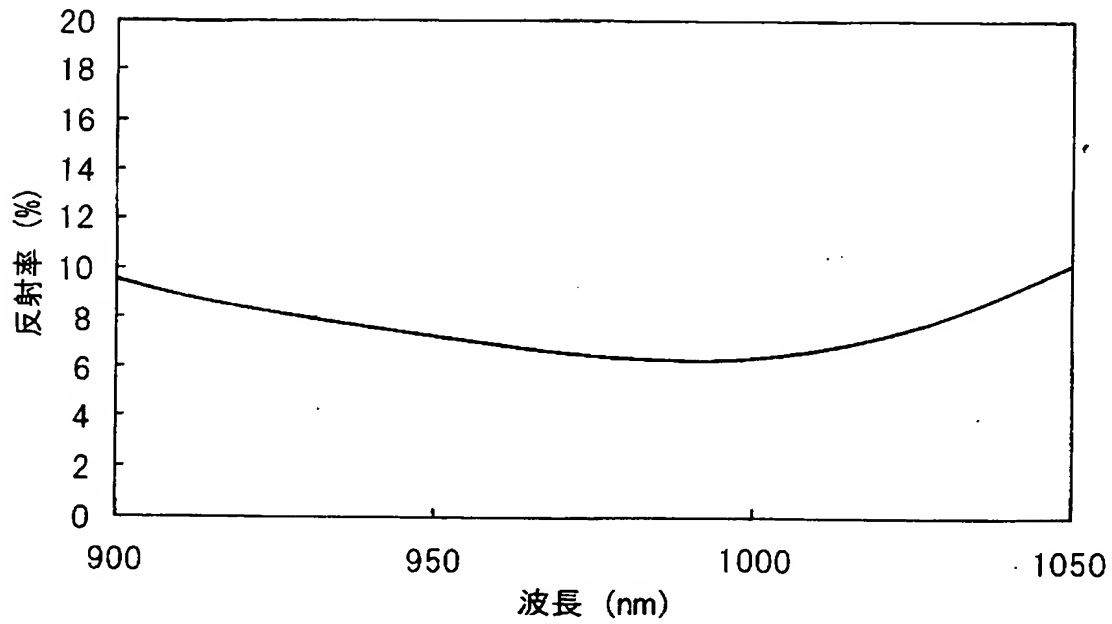
【図 9 6】



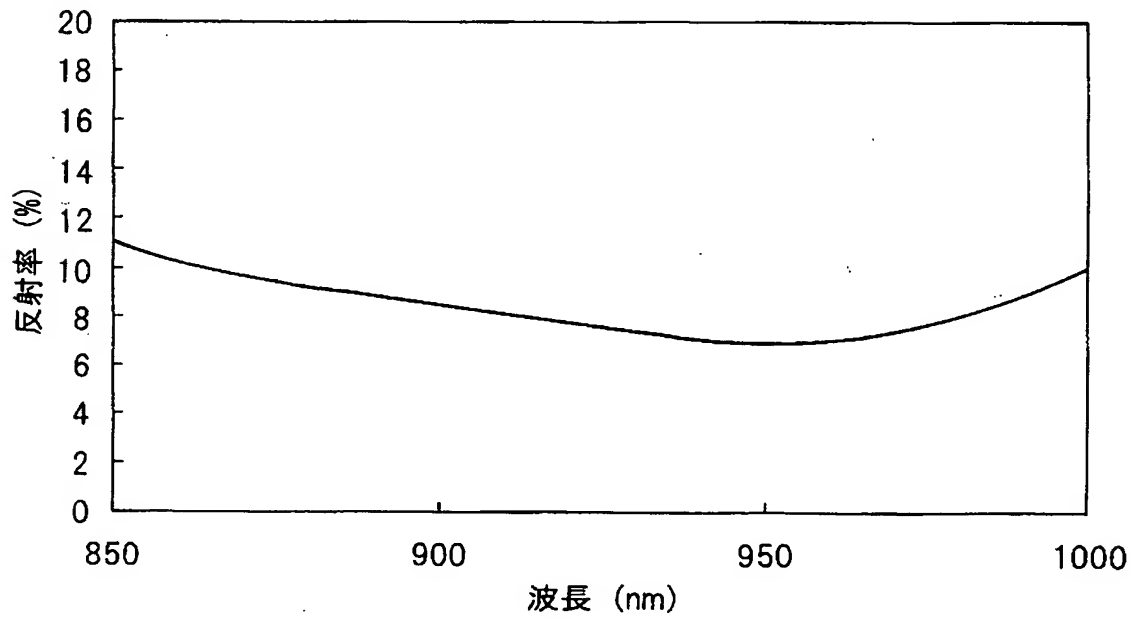
【図 9 7】



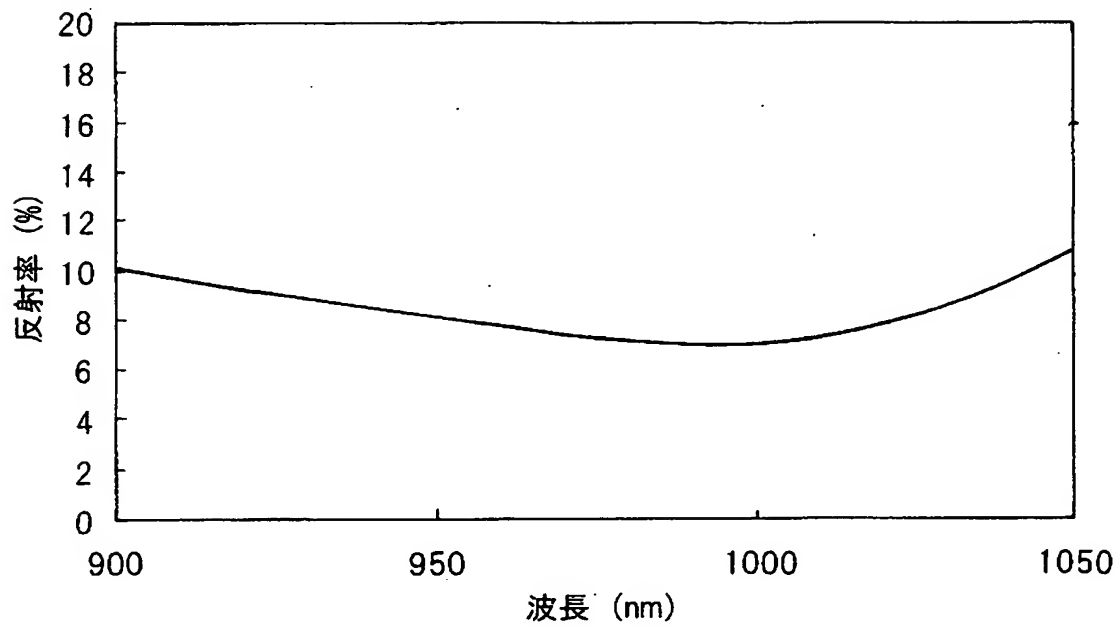
【図 9 8】



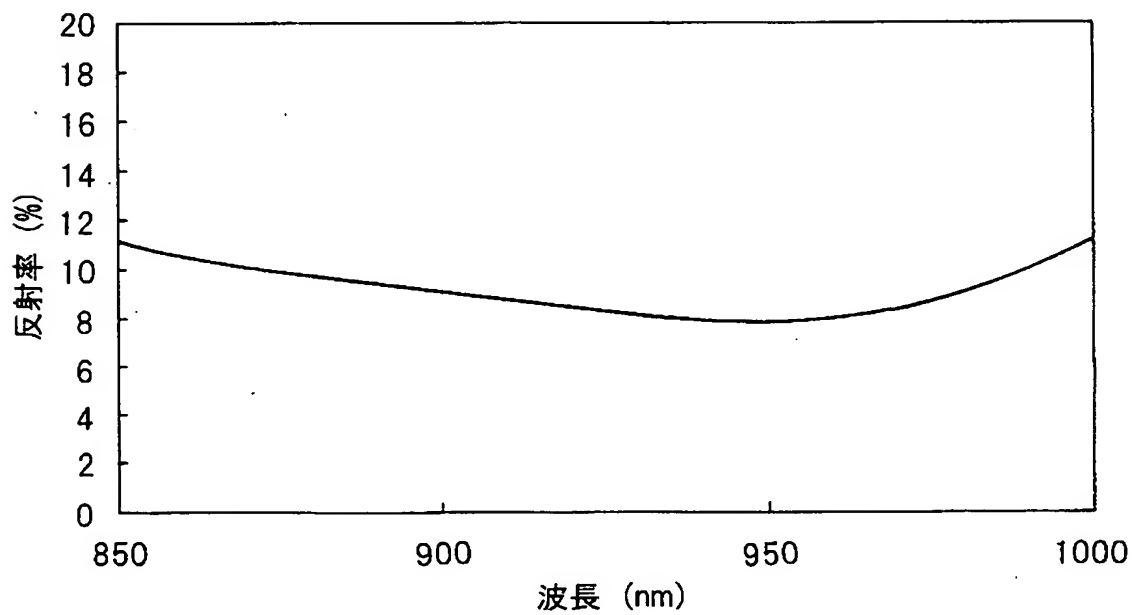
【図 9 9】



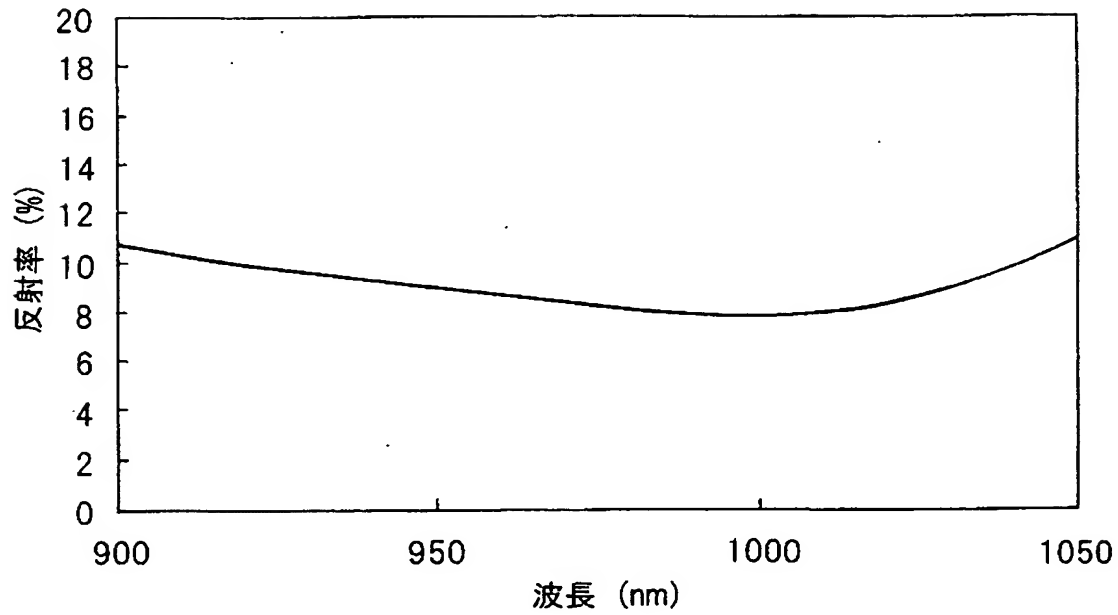
【図 100】



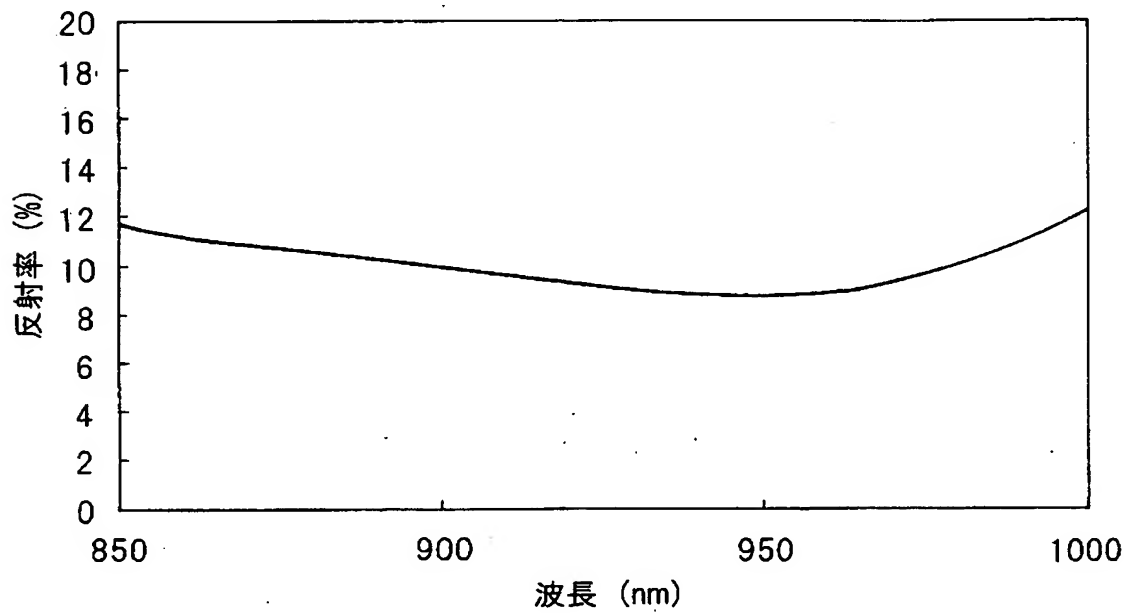
【図 101】



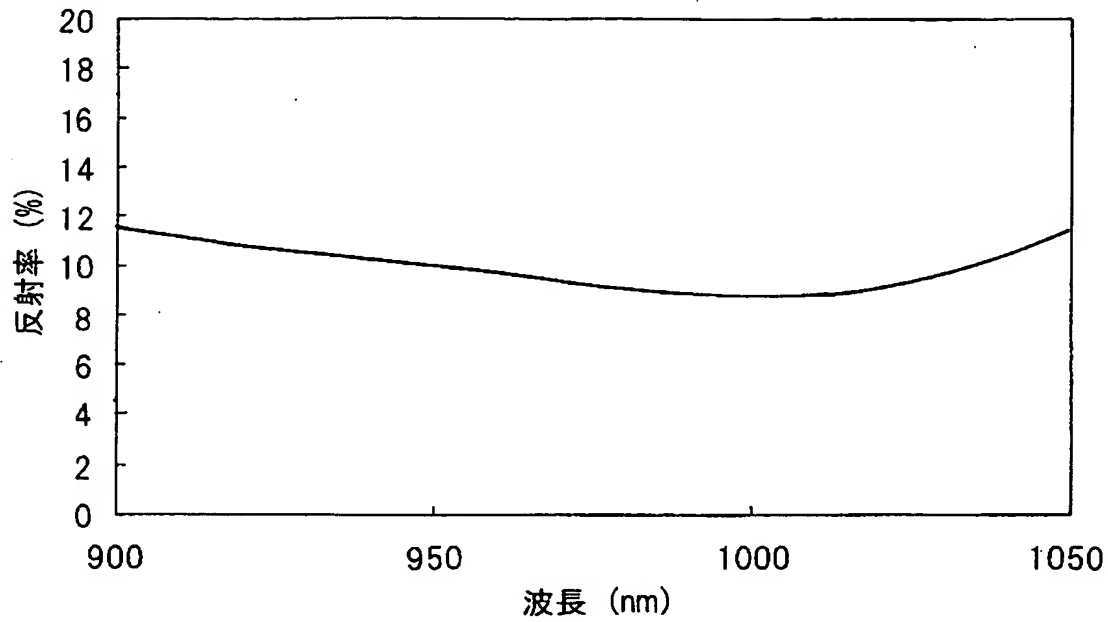
【図 102】



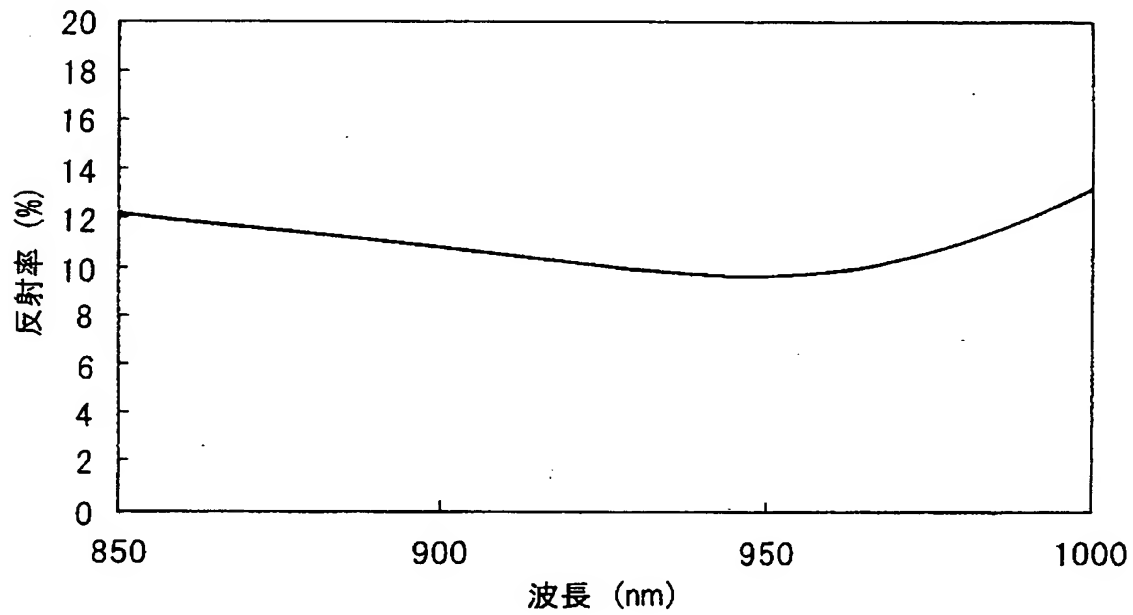
【図 103】



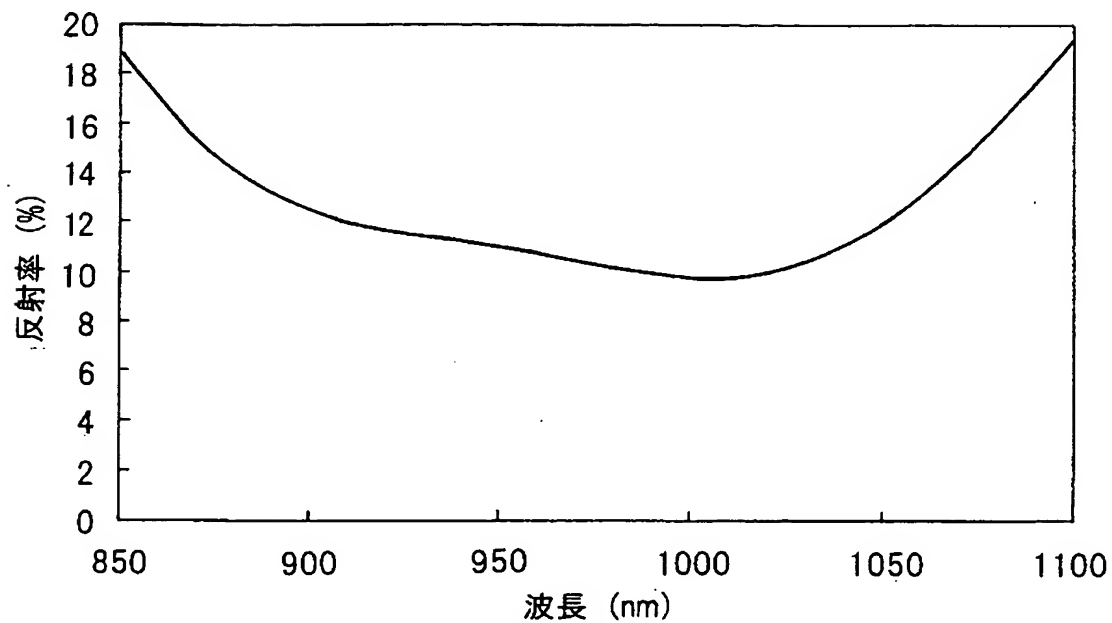
【図 104】



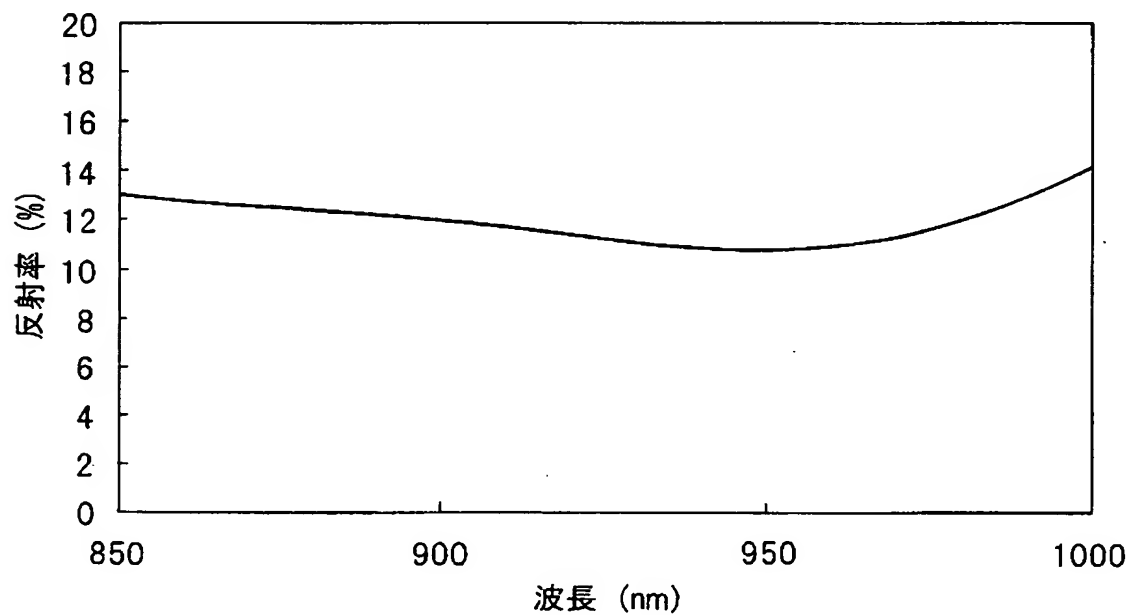
【図 105】



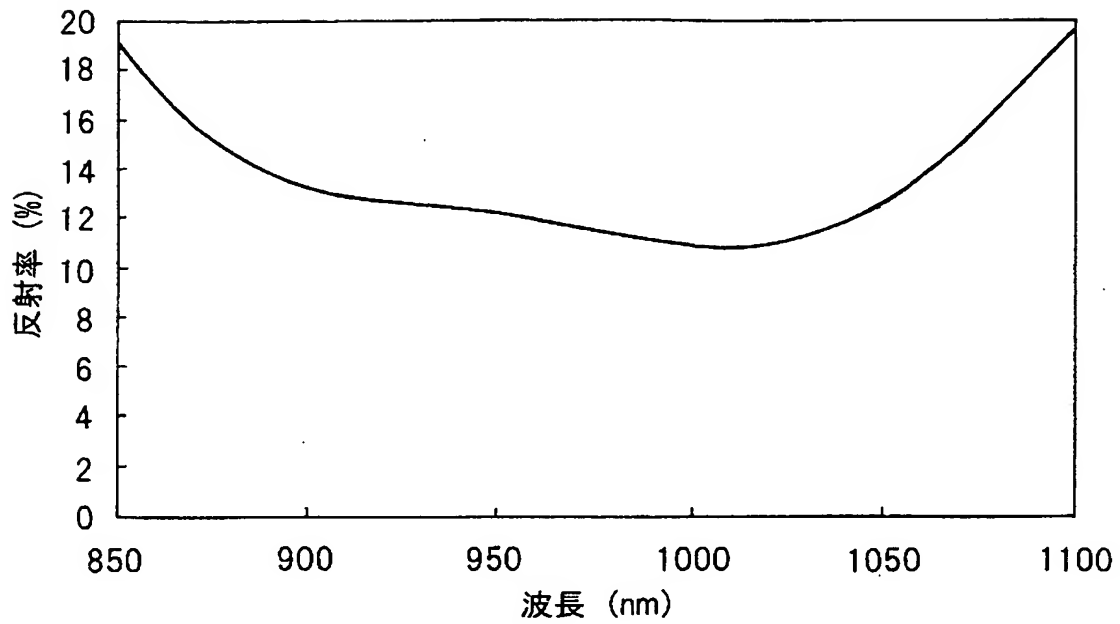
【図 106】



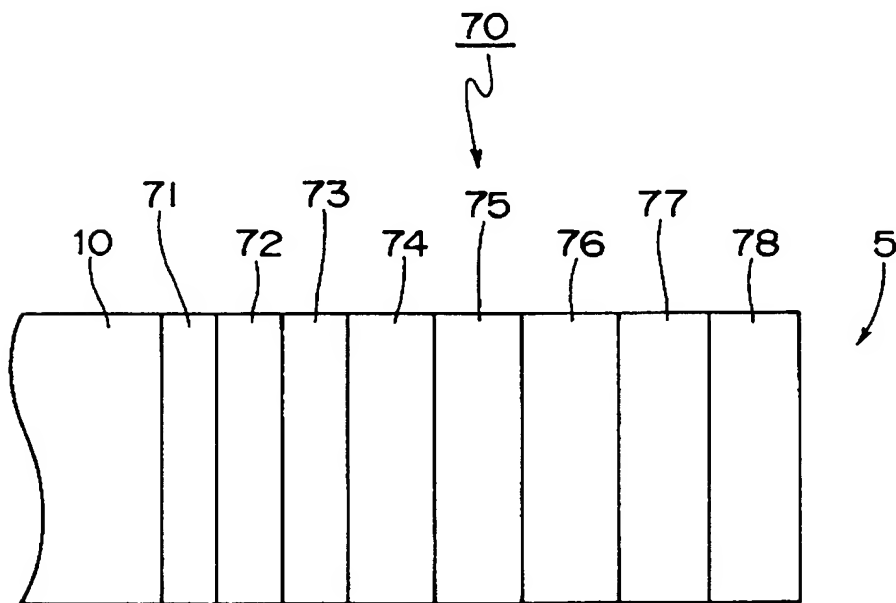
【図 107】



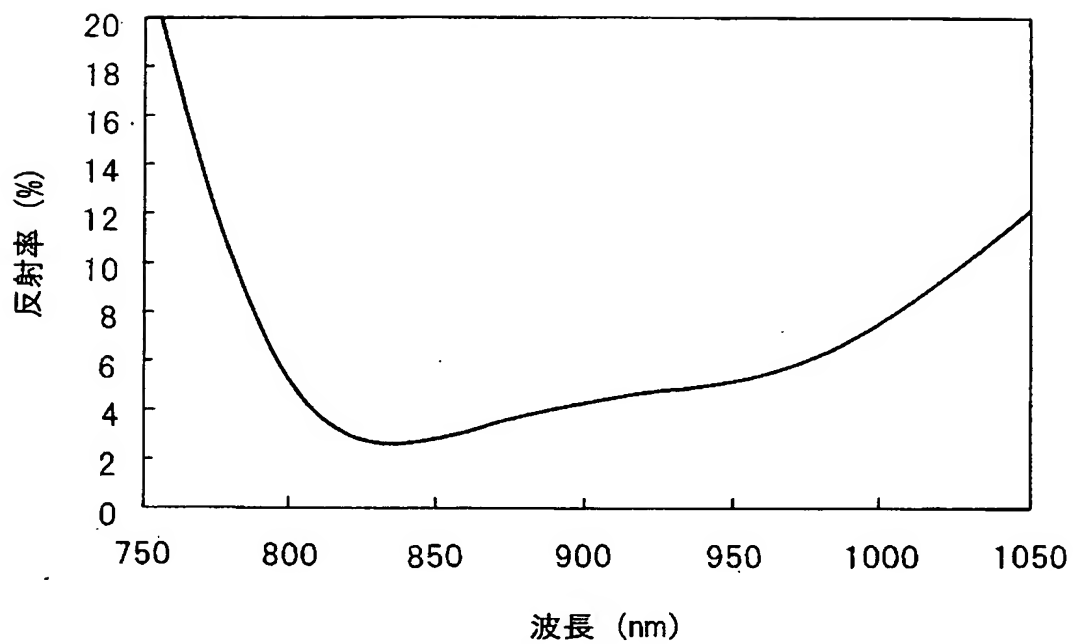
【図 108】



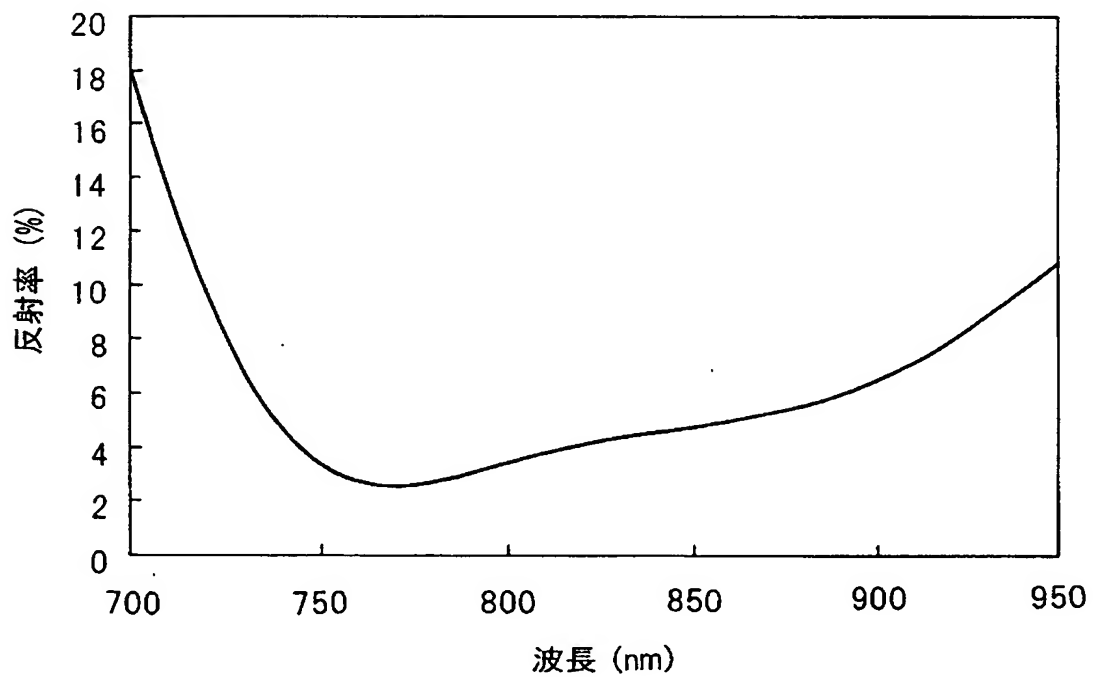
【図 109】



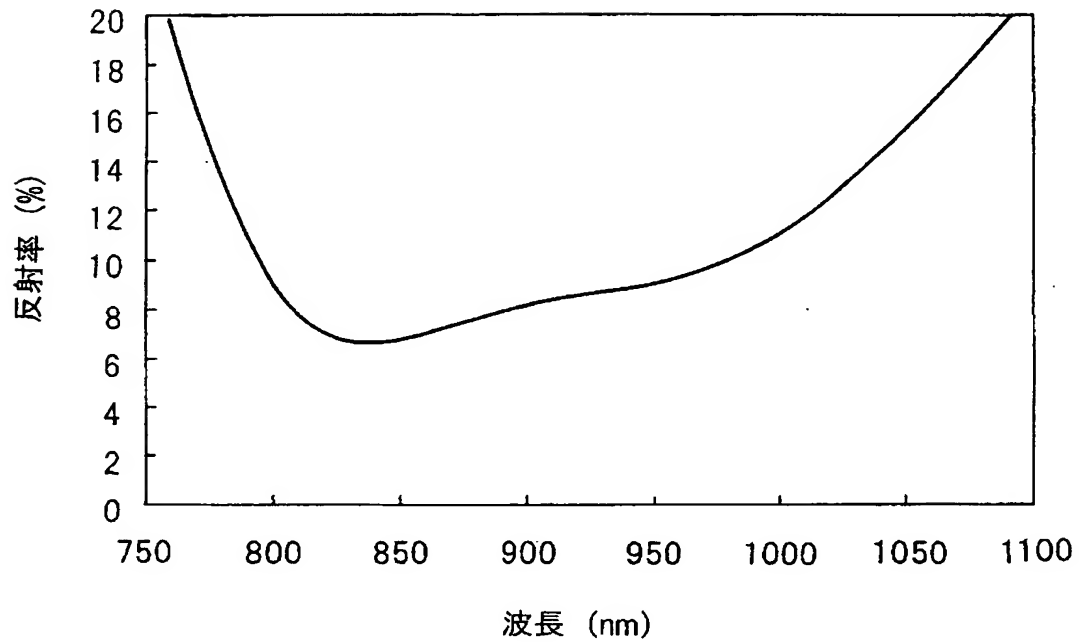
【図 110】



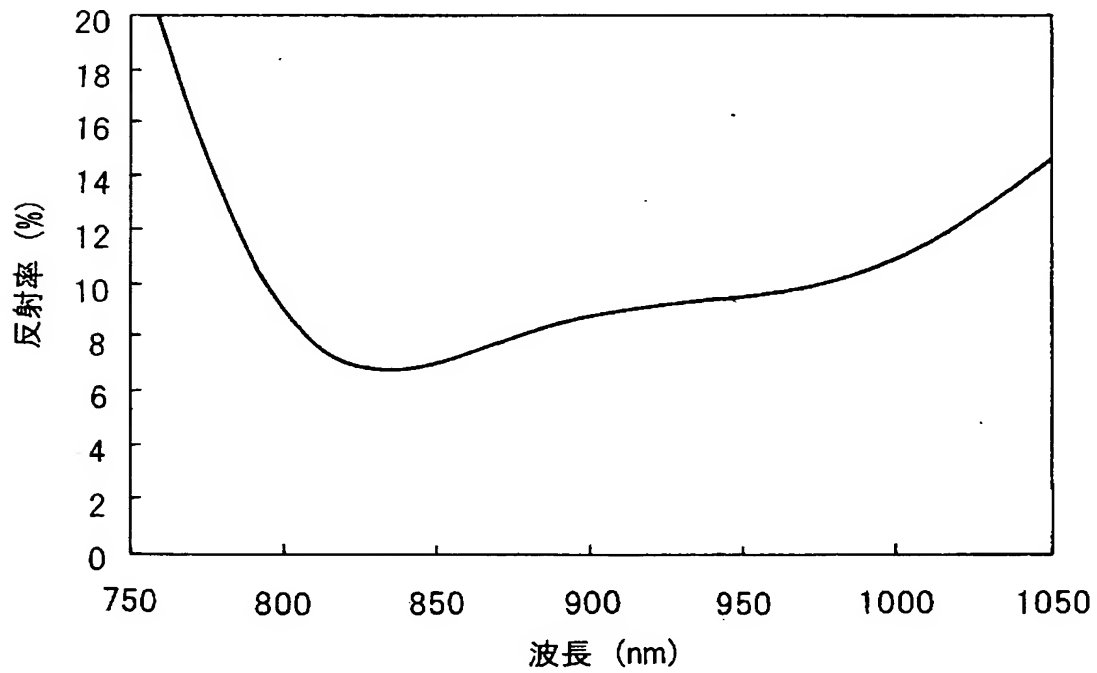
【図 111】



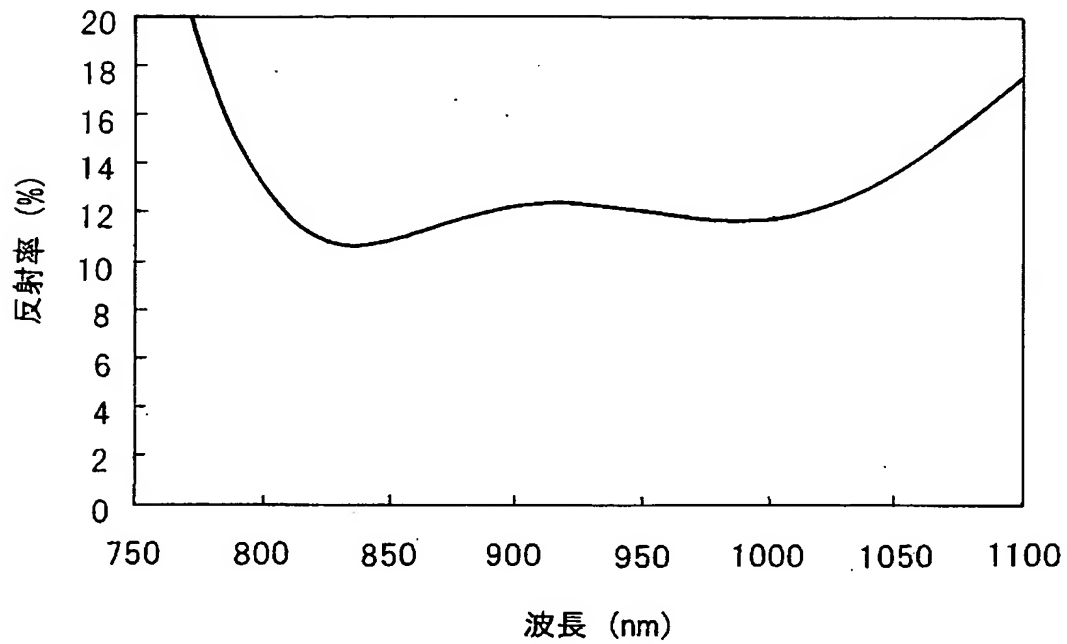
【図 1 1 2】



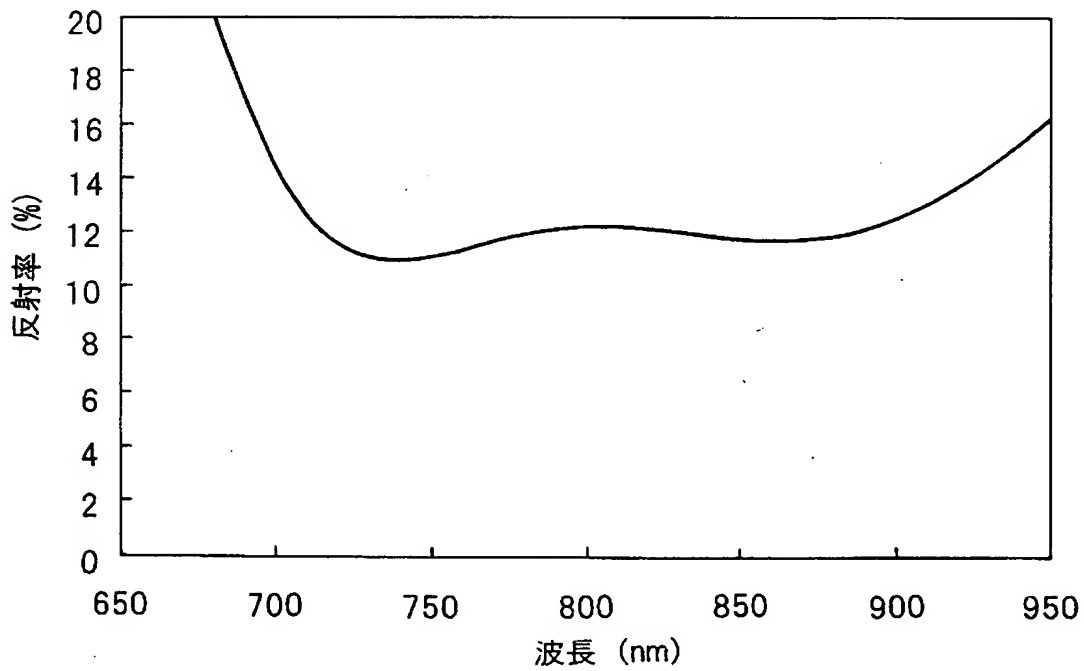
【図 1 1 3】



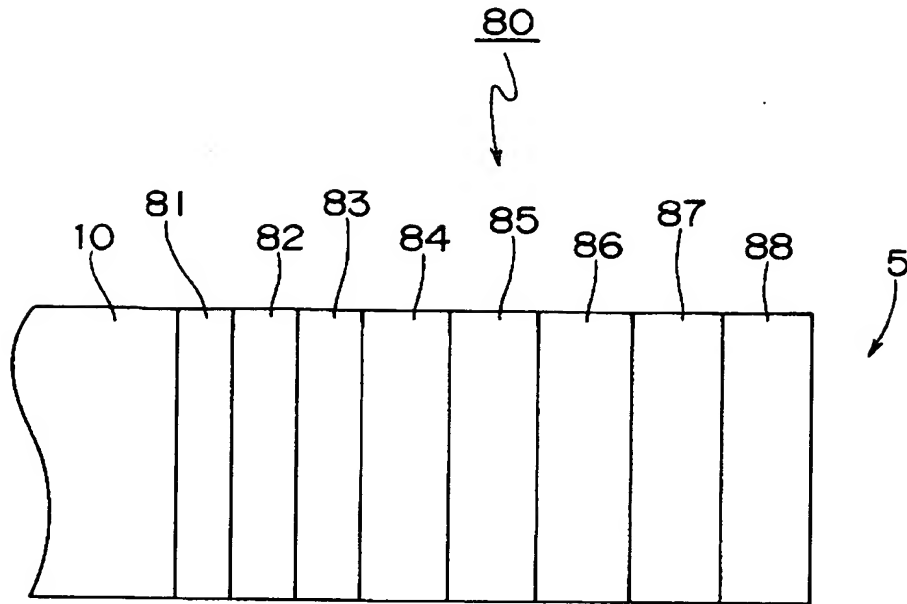
【図 114】



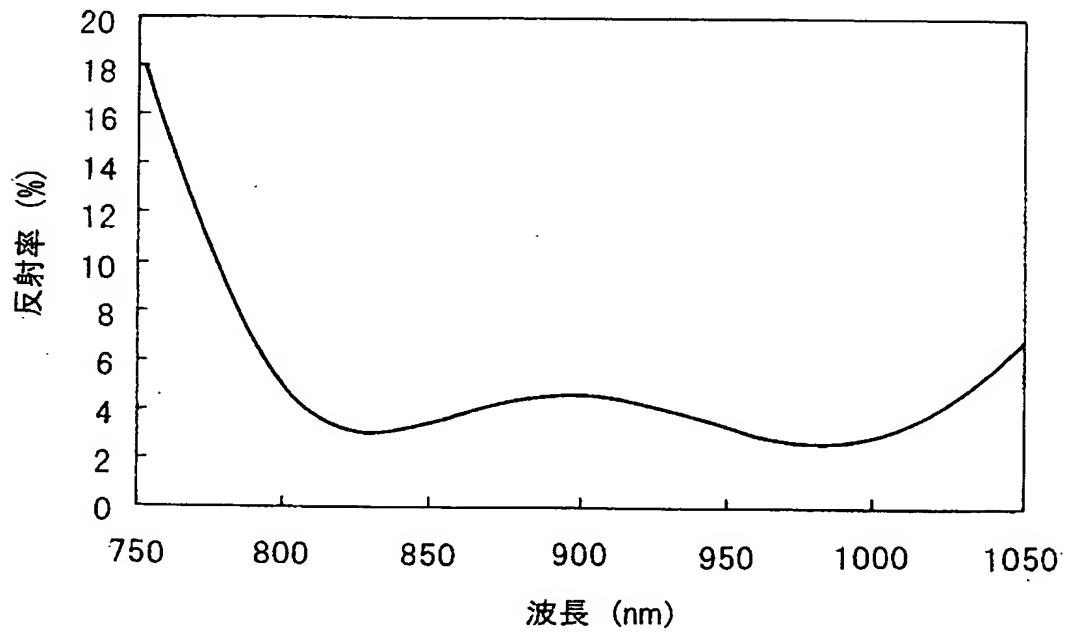
【図 115】



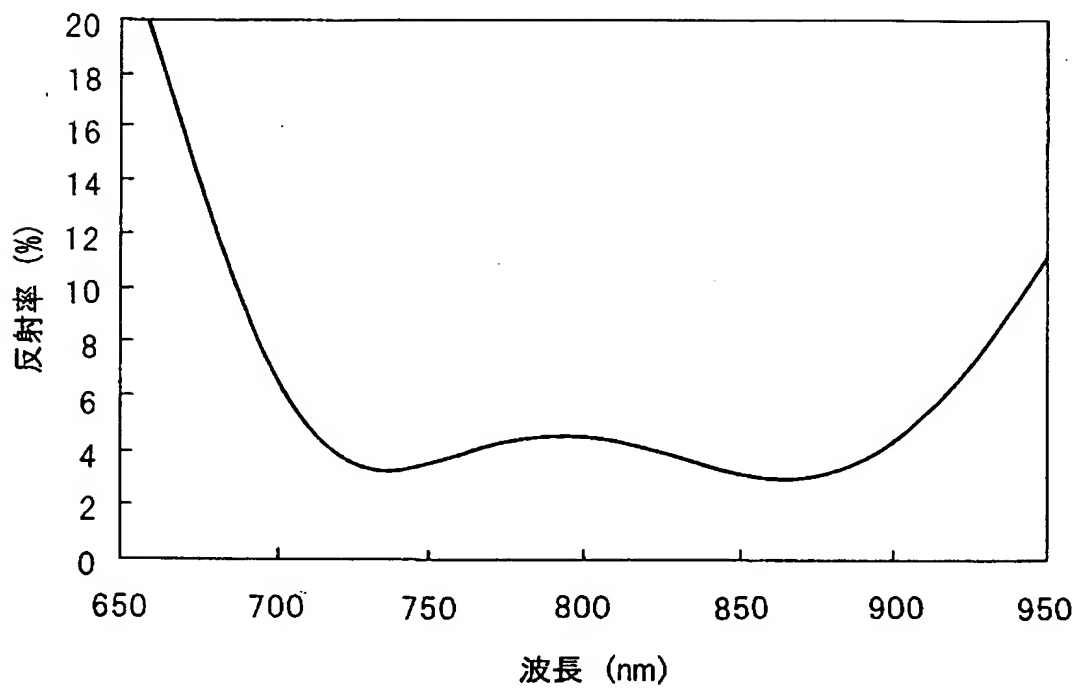
【図 116】



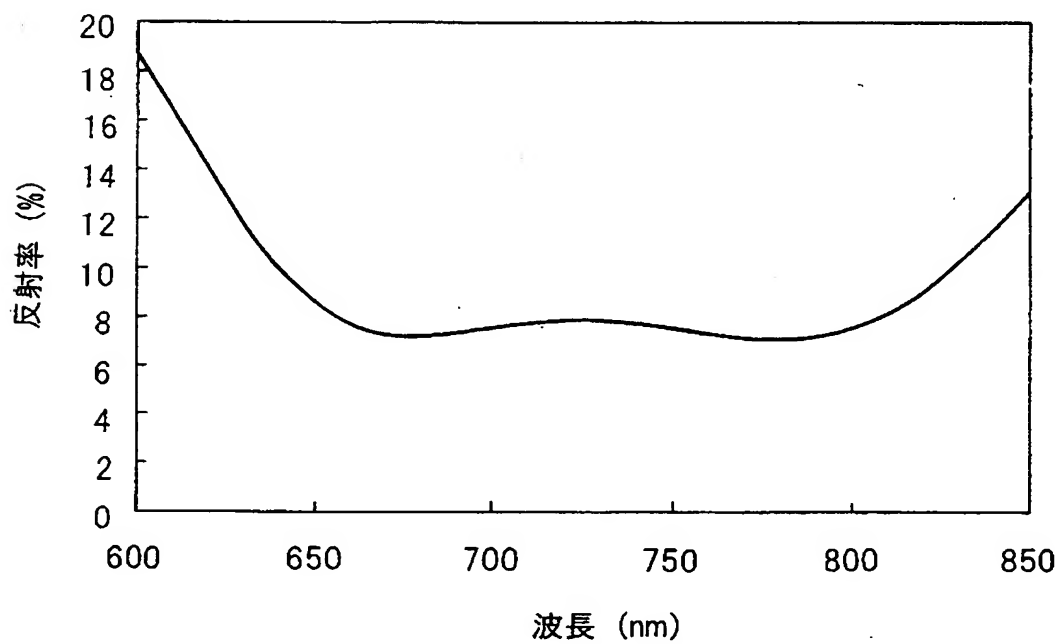
【図 117】



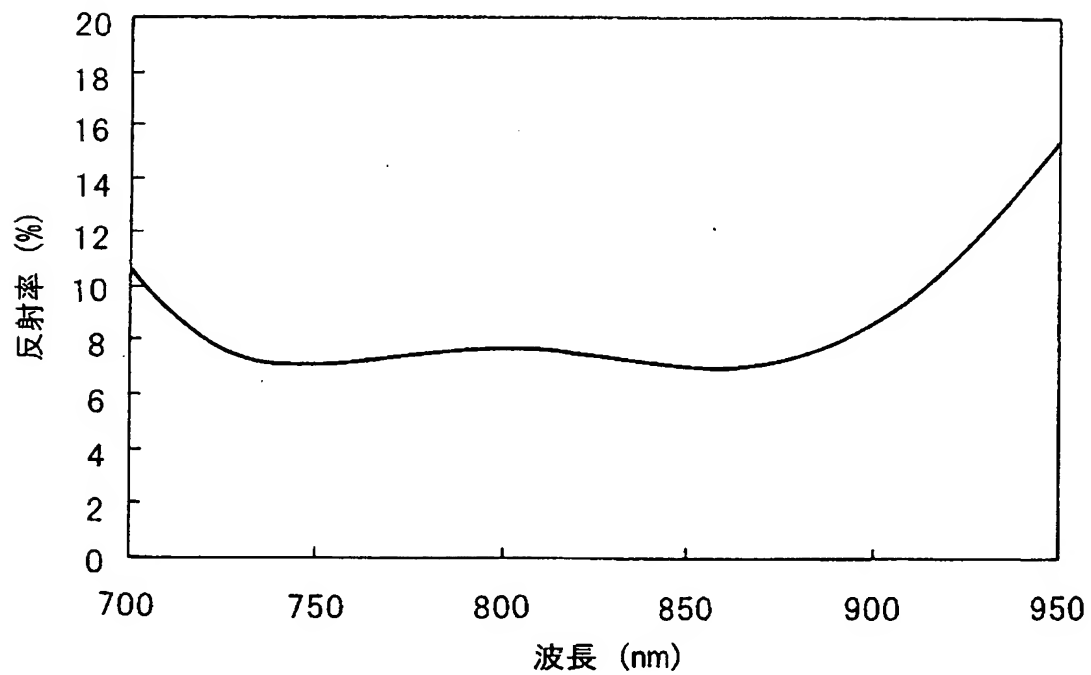
【図 118】



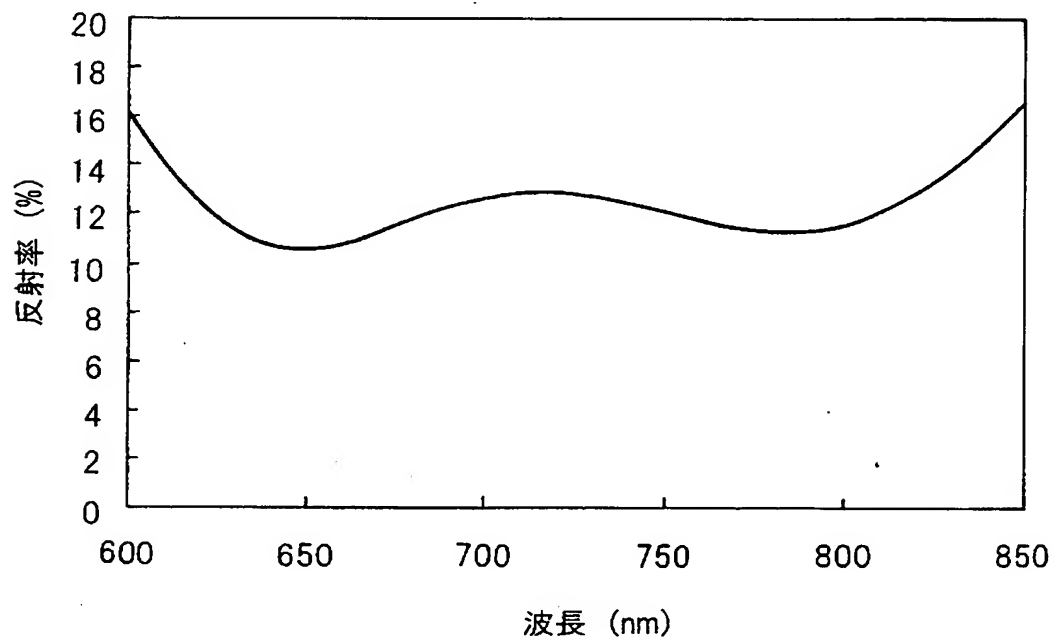
【図 119】



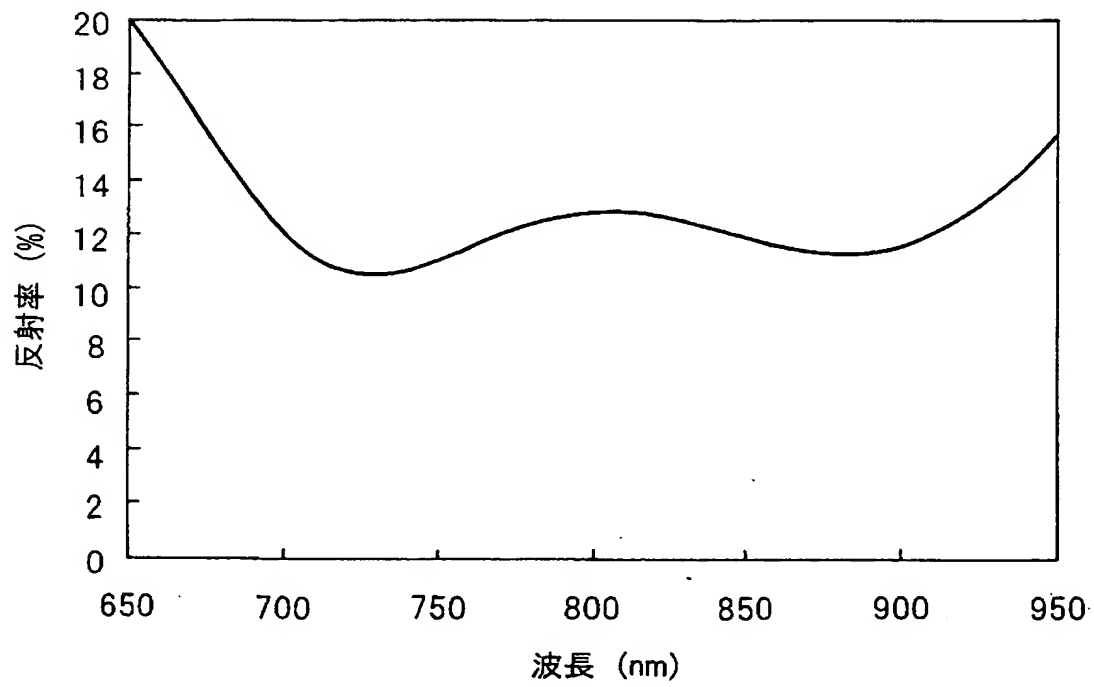
【図 120】



【図 121】



【図 122】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 広い波長帯域にわたって低反射率を有する反射膜を備えた半導体光素子を提供する。

【解決手段】 半導体光素子は、活性層と、前記活性層を挟む2枚のクラッド層とからなる導波層10を含む積層構造体と、前記積層構造体の一对の相対する端面のうち少なくとも一方の端面に形成された多層反射膜20とを備え、前記多層反射膜は、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ が、前記導波層を導波する光の波長 λ について、 $\sum n_i d_i > \lambda/4$ の関係を満足すると共に、前記多層反射膜は、反射率が前記波長 λ の場合の反射率 $R(\lambda)$ を基準として-1%から+2.0%の範囲内となる前記波長 λ を含む連続する波長帯域幅 $\Delta\lambda$ を、前記波長 λ で割った値 $\Delta\lambda/\lambda$ が0.062以上である。

【選択図】 図5

認定・付加情報

特許出願の番号	特願 2003-275554
受付番号	50301181345
書類名	特許願
担当官	第二担当上席 0091
作成日	平成 15 年 7 月 22 日

<認定情報・付加情報>

【特許出願人】

【識別番号】	000006013
【住所又は居所】	東京都千代田区丸の内二丁目 2 番 3 号
【氏名又は名称】	三菱電機株式会社

【代理人】

申請人

【識別番号】	100086405
【住所又は居所】	大阪府大阪市中央区城見 1 丁目 3 番 7 号 IMP ビル 青山特許事務所

【氏名又は名称】	河宮 治
----------	------

【選任した代理人】

【識別番号】	100098280
【住所又は居所】	大阪府大阪市中央区城見 1 丁目 3 番 7 号 IMP ビル 青山特許事務所

【氏名又は名称】	石野 正弘
----------	-------

【選任した代理人】

【識別番号】	100113170
【住所又は居所】	大阪府大阪市中央区城見 1 丁目 3 番 7 号 IMP ビル 青山特許事務所

【氏名又は名称】	稲葉 和久
----------	-------

特願 2 0 0 3 - 2 7 5 5 5 4

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[0 0 0 0 0 6 0 1 3]

1. 変更年月日

1 9 9 0 年 8 月 2 4 日

[変更理由]

新規登録

住 所

東京都千代田区丸の内 2 丁目 2 番 3 号

氏 名

三菱電機株式会社